

Universität für Bodenkultur Wien

Department für Nachhaltige Agrarsysteme
Institut für Nutztierwissenschaften



Genetische Charakterisierung der Milcheiweißvarianten beim Pinzgauer-Rind

Masterarbeit

vorgelegt von:

Christine Berger

Betreuer:

PD DI Dr. **Birgit Fürst-Waltl**

DI Dr. **Hermann Schwarzenbacher**

Wien, August 2018

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich eidesstattlich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig angefertigt und verfasst habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet und alle Stellen, die inhaltlich oder wörtlich den angegebenen Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Ort und Datum

Unterschrift

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all jenen Menschen bedanken, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt meinen beiden Betreuern PD DI Dr. Birgit Fürst-Waltl, Universität für Bodenkultur und DI Dr. Hermann Schwarzenbacher, ZuchtData, die mit ihrer hervorragenden und fachlich kompetenten Betreuung wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Bei Dr. Christian Fürst, ZuchtData bedanke ich mich für die Berechnung der deregressierten Zuchtwerte.

Ein Dankeschön an Prof. Dr. Helmut Mayer, Universität für Bodenkultur und Dr. Simone Jung, Bayern Genetik für die Untersuchung der Proben. Für die Bereitstellung der Ergebnisse aus älteren Untersuchungen gilt Prof. Dr. Georg Erhardt und Prof. Dr. Helmut Mayer ein Dank.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Ing. Christian Dullnigg, Obmann der ARGE Pinzgauer und DI Mathias Kinberger, Geschäftsführer der ARGE Pinzgauer, die die Idee dieser Masterarbeit unterstützten und ermöglichten.

Bei Ing. Thomas Sendlhofer vom Rinderzuchtverband Salzburg bedanke ich mich für die fachliche Unterstützung, dem Landeskontrollverband und der Besamungsanstalt Kleßheim danke ich für die Bereitstellung der Probengefäße bzw. für die Einsendung der Spermaproben.

Ich möchte den Bäuerinnen und Bauern für die vielen netten Gespräche bei der Probensammlung danken.

Bei all jenen, die ich hier nicht namentlich erwähnt habe, die aber zum Gelingen dieser Masterarbeit beigetragen haben, bedanke ich mich aufs Herzlichste.

Der größte Dank gilt meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglichten und mich bei all meinen Entscheidungen unterstützten und bestärkten. Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Geschwistern und meinem Freund Manfred, auf die ich immer zählen konnte.

Zu guter Letzt möchte ich mich noch bei meinen Freunden und Studienkollegen für die schöne gemeinsame und unvergessliche Studienzeit bedanken.

Abstract

In the current study the allele, genotype and haplotype frequencies of the different variants of α_{s1} -, β - and κ -casein as well as β -lactoglobulin were estimated for the Pinzgauer cattle population. In 2017, 441 Pinzgauer cattle were examined and 593 data from former studies were available. Additionally, it was analysed whether the individual variants and genotypes have an impact on the different dairy traits.

The α_{s1} -casein variant B is the predominant variant with a frequency of nearly 80 %, the variant C occurs at a frequency of more than 20 %. Cows with the genotype BB showed significant benefits for the milk production trait fat yield compared to animals with the genotype BC and CC. Pinzgauer cattle with the genotype BB had also significant benefits for fat content in comparison to cattle with the genotype BC. In recent years, there has been much discussion about A2 milk. The genetic β -casein variant A2 is the most common variant with a frequency of 53.51 %, followed by variant A1 with 44.67 %. Variants B and C are rare. Animals with the genotype A1A1 had a significantly higher fat content and fat yield compared to cattle with the genotype A2A2. Animals with the genotype A1A2 had significantly higher fat and protein contents in comparison to cattle with the genotype A2A2. For κ -casein, the genetic variant A is the predominant variant with about 78 %, variant B is less common with just over 20 %. Variants E and G occur with low frequencies. Cattle with the genotype AA had a significantly higher milk yield than those with genotype BB, animals with the genotype AB and BB showed a significantly higher protein content compared to cattle with the genotype AA. The β -lactoglobulin variant B had a frequency of 92 %, variant A was rare with 8 %. Cows with the β -lactoglobulin genotype BB had significantly higher milk contents, the genotype AB had significantly higher milk, fat and protein yield.

The α_{s1} - β - κ -casein haplotype B-A1-A is the most common with a frequency of 28.1 %, followed by haplotype B-A2-A with 25.05 %. The α_{s1} -casein variant C is predominantly inherited with the β -casein variant A2. In the β - κ -casein genotype differences for fat and protein contents were noted. However, it is questionable whether the observed associations between the casein variants or rather β -lactoglobulin variants and milk production traits reflect a causal relationship.

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden die Allel-, Genotyp- und Haplotypfrequenzen der verschiedenen Varianten vom α_{s1} -, β - und κ -Casein sowie vom β -Lactoglobulin für die Pinzgauerpopulation geschätzt. Dafür wurden im Jahr 2017 441 Pinzgauer-Tiere untersucht, zusätzlich standen 593 Daten aus älteren Untersuchungen zur Verfügung. Außerdem wurde überprüft, ob die einzelnen Genotypen einen Einfluss auf Milchleistungsmerkmale haben.

Beim Pinzgauer-Rind ist die α_{s1} -Casein-Variante B mit knapp 80 % die vorherrschende Variante, Variante C kommt mit einer Häufigkeit von über 20 % vor. Kühe mit dem Genotyp BB zeigten in der vorliegenden Arbeit eine signifikant höhere Fettmenge im Vergleich zu jenen mit den Genotypen BC und CC. Kühe mit dem Genotyp BB hatten außerdem einen signifikant höheren Fettgehalt als Tiere mit dem Genotyp BC. In den letzten Jahren wird vermehrt über das Thema A2-Milch diskutiert. Die genetische Variante A2 beim β -Casein tritt beim Pinzgauer-Rind mit 53,51 % am häufigsten auf, gefolgt von Variante A1 mit 44,67 %. Die Varianten B und C kommen selten vor. Tiere mit dem Genotyp A1A1 hatten gegenüber Rindern mit dem Genotyp A2A2 einen signifikant höheren Fettgehalt und eine signifikant höhere Fettmenge, Pinzgauer-Rinder mit dem Genotyp A1A2 wiesen im Vergleich zu jenen mit dem Genotyp A2A2 einen signifikant höheren Fett- und Eiweißgehalt auf. Beim κ -Casein ist die genetische Variante A mit circa 78 % die vorherrschende Variante, Variante B kommt mit etwas mehr als 20 % seltener vor. Die Varianten E und G treten mit geringer Häufigkeit auf. Rinder mit dem Genotyp AA wiesen eine signifikant höhere Milchleistung als Tiere mit dem Genotyp BB auf, Pinzgauer-Rinder mit den Genotypen AB und BB zeigten einen signifikant höheren Proteingehalt als jene mit dem Genotyp AA. Die β -Lactoglobulin-Variante B wies eine Frequenz von 92 % auf, Variante A kam mit 8 % selten vor. Kühe mit dem β -Lactoglobulin-Genotyp BB hatten signifikant höhere Milchinhaltsstoffe, Tiere mit dem Genotyp AB eine signifikant höhere Milch-, Fett- und Eiweißmenge.

Der α_{s1} - β - κ -Casein-Haplotyp B-A1-A kommt mit 28,1 % am häufigsten vor, gefolgt vom Haplotyp B-A2-A mit 25,05 %. Die α_{s1} -Casein-Variante C wird überwiegend oft mit der β -Casein-Variante A2 vererbt. Beim β - κ -Casein-Genotyp wurden signifikante Unterschiede bei den Fett- und Eiweißgehalten festgestellt. Die beobachteten Zusammenhänge zwischen den Casein-Varianten bzw. β -Lactoglobulin-Varianten und Leistungsmerkmalen müssen aber nicht kausal sein.

INHALTSVERZEICHNIS

Abstract	IV
Kurzfassung	V
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung, Ziele und Fragestellung	1
2 Literaturübersicht.....	3
2.1 Rassenbeschreibung Pinzgauer	3
2.2 Milchprotein	3
2.3 Casein.....	3
2.3.1 α_{s1} -Casein	4
2.3.1.1 Verteilung der α_{s1} -Casein-Varianten bei verschiedenen Rinderrassen	4
2.3.1.2 Zusammenhänge von α_{s1} -Casein-Varianten und Produktionsmerkmalen	6
2.3.2 α_{s2} -Casein	7
2.3.3 β -Casein	7
2.3.3.1 Verteilung der β -Casein-Varianten bei verschiedenen Rinderrassen	7
2.3.3.2 Zusammenhänge von β -Casein-Varianten und Produktionsmerkmalen.....	10
2.3.3.3 Einfluss des β -Caseins auf die Gesundheit des Menschen	11
2.3.4 κ -Caseine	14
2.3.4.1 Verteilung der κ -Casein-Varianten bei verschiedenen Rinderrassen	14
2.3.4.2 Zusammenhänge von κ -Casein-Varianten und Produktionsmerkmalen	16
2.3.5 Casein-Haplotypen	18
2.4 Molkenproteine	19
2.4.1 β -Lactoglobulin.....	19
2.4.1.1 Verteilung der β -Lactoglobulin-Varianten bei verschiedenen Rassen.....	19
2.4.1.2 Zusammenhänge von β -Lactoglobulin-Varianten und Produktionsmerkmalen	21
3 Tiere, Material und Methoden.....	23
3.1 Ausgangsdaten	23
3.2 Statistische Auswertung	24
3.2.1 Berechnung der Allel-, Genotyp- und Haplotypfrequenzen	24
3.2.2 Schätzung von Allelfrequenzen	24
3.2.3 Schätzung von Haplotypfrequenzen	25
3.2.4 Berechnung von Unterschieden hinsichtlich Fremdgenanteile	25

3.2.5	Effekt von (kombinierten) Genotypen auf Milchleistungsmerkmale	25
3.2.5.1	α_{s1} -Casein-Genotypen	26
3.2.5.2	β -Casein-Genotypen.....	26
3.2.5.3	κ -Casein-Genotypen	27
3.2.5.4	β -Lactoglobulin-Genotypen	27
3.2.5.5	β - κ -Casein-Genotypen.....	27
3.2.5.6	α_{s1} - β - κ -Casein-Genotypen.....	27
4	Ergebnisse und Diskussion	28
4.1	Allel- und Genotypfrequenzen	28
4.1.1	α_{s1} -Casein	28
4.1.2	β -Casein	31
4.1.3	κ -Casein	35
4.1.4	β -Lactoglobulin.....	39
4.1.5	Kombinierte Genotypen.....	41
4.2	Haplotypfrequenzen.....	42
4.3	Unterschiede bei Milchleistungsmerkmalen.....	43
4.3.1	Effekt der α_{s1} -Casein-Genotypen auf Milchleistungsmerkmale	43
4.3.2	Effekt der β -Casein-Genotypen auf Milchleistungsmerkmale.....	45
4.3.3	Effekt der κ -Casein-Genotypen auf Milchleistungsmerkmale	47
4.3.4	Effekt der β -Lactoglobulin-Genotypen auf Milchleistungsmerkmale.....	48
4.3.5	Effekt der β - κ -Casein-Genotypen auf Milchleistungsmerkmale.....	50
4.3.6	Effekt der α_{s1} - β - κ -Casein-Genotypen auf Milchleistungsmerkmale.....	51
5	Schlussfolgerung.....	53
6	Literaturverzeichnis.....	56
7	Tabellenverzeichnis	61

Abkürzungsverzeichnis

PI	Pinzgauer
RF	Red Friesian
LS	Least Square
α	Alpha
β	Beta
κ	Kappa
kb	„Kilobasen“, 1.000 Basenpaare am DNA-Strang

1 Einleitung, Ziele und Fragestellung

Das Milcheiweiß ist ein wichtiger Bestandteil in der Milch. Das Rohprotein wird in Reinprotein und Nicht-Protein-Stickstoff unterteilt, wobei es zu circa 95 % aus Reinprotein und zu 5 % aus Nicht-Protein-Stickstoff besteht. Das Reinprotein wiederum wird in Caseine und Molkenproteine gegliedert, wobei die Caseine circa 80 % und die Molkenproteine 20 % ausmachen (Mayer, s.a.). Das mengenmäßig größte Molkenprotein ist das β -Lactoglobulin (Farrell et al., 2004).

Das Casein wird in vier primäre Fraktionen unterteilt: α_{s1} -, α_{s2} -, β - und κ -Caseine, wobei es bei jedem dieser Proteine verschiedene genetische Varianten gibt (Swaisgood, 1992). In vielen wissenschaftlichen Arbeiten wurden Zusammenhänge von Caseinen und Molkenproteinen mit verschiedenen Produktionsmerkmalen und gesundheitlichen Aspekten untersucht.

In den letzten Jahren wird vermehrt über das Thema A2-Milch diskutiert. Die Variante A2 ist eine von insgesamt 15 Varianten des β -Caseins (Farrell et al., 2004). Das Thema A2-Milch geht vor allem von Neuseeland aus, dort wurde im Jahr 2000 die a2 Milk Company gegründet und Milch als A2-Milch vermarktet. Dieses Unternehmen bietet A2-Milch mittlerweile in Neuseeland, Australien, USA, Großbritannien und China an (a2 Milk Company, s.a.). Bei der Verdauung von A1-Milch wird das Peptid Beta-Casomorphin 7 gebildet (Jinsmaa und Yoshikawa, 1999), welches bei der A2-Milch nicht (De Noni, 2008) oder nur in geringer Menge entsteht (Cieślińska et al., 2007). Das Beta-Casomorphin 7 wird in einigen Untersuchungen als Risikofaktor für Krankheiten wie Diabetes mellitus Typ 1 und Herz-Kreislaufkrankungen genannt und mit Verdauungsbeschwerden in Zusammenhang gebracht (Elliott et al., 1999; McLachlan, 2001; Ho et al., 2014; Jianqin et al., 2016; He et al., 2017). Obwohl die Ergebnisse kritisch gesehen werden (Truswell, 2005; EFSA, 2009; Max-Rubner-Institut, 2016) und unabhängige Humanstudien fehlen, da die bisherigen Studien von der a2 Milk Company finanziell unterstützt bzw. finanziert wurden (Ho et al., 2014; Jianqin et al., 2016; He et al., 2017), ist es von Interesse, die Häufigkeiten der verschiedenen β -Casein-Varianten in der Population des Pinzgauer-Rindes festzustellen. Bei der Rasse Pinzgauer liegen Ergebnisse aus älteren Studien (Buchberger et al., 1996; Erhardt, 1996; Mayer et al., 1997; Caroli et al., 2010), aber keine aktuellen Ergebnisse vor. In der vorliegenden Arbeit wurden geprüfte Stiere, aktuelle Teststiere sowie bedeutende Stiermütter untersucht, damit die Allelfrequenzen für

die Rasse möglichst genau geschätzt werden können. Neben dem β -Casein wurden auch das α_{s1} - und das κ -Casein sowie das β -Lactoglobulin untersucht.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Allel- und Genotypfrequenzen der Varianten des α_{s1} -, β - und κ -Caseins sowie des β -Lactoglobulins in der Pinzgauerpopulation zu schätzen. Außerdem werden Haplotypfrequenzen für die Gene *CSN1S1* (α_{s1} -Casein), *CSN2* (β -Casein) sowie *CSN3* (κ -Casein) in der aktuellen Population geschätzt. Ein weiteres Ziel ist es, zu klären, ob die einzelnen Varianten und Genotypen einen Einfluss auf Milchleistungsmerkmale haben. Diese Studie kann jedoch keine Aussage über eine mögliche Kausalität dieser Zusammenhänge zwischen Casein-Varianten bzw. β -Lactoglobulin-Varianten und Milchleistungsmerkmalen machen.

Folgende Fragestellungen sollen in dieser Arbeit beantwortet werden:

- Wie hoch sind die Allelfrequenzen der verschiedenen Varianten beim α_{s1} -, β - und κ -Casein sowie beim β -Lactoglobulin und wie häufig treten welche Genotypen auf?
- Gibt es Unterschiede beim Auftreten der Frequenzen zwischen reinrassigen Pinzgauer-Rindern und Pinzgauer-Rindern mit Red Holstein-Anteil?
- Wie hoch sind die geschätzten Haplotypfrequenzen für die Gene *CSN1S1* (α_{s1} -Casein), *CSN2* (β -Casein) sowie *CSN3* (κ -Casein) in der Pinzgauerpopulation?
- Sind bei den Milchleistungsmerkmalen Unterschiede zwischen verschiedenen Varianten und Genotypen erkennbar?

2 Literaturübersicht

2.1 Rassenbeschreibung Pinzgauer

Das Pinzgauer-Rind ist eine österreichische Zweinutzungsrasse. Laut dem Jahresbericht der ZAR von 2016 gibt es in Österreich 37.790 Pinzgauer-Rinder, das entspricht einem Rassenanteil von 1,9 %. Im Bundesland Salzburg werden mit einer Anzahl von 20.651 am meisten Pinzgauer-Rinder gehalten, gefolgt von Kärnten mit 4.558 und Tirol mit 3.830 Pinzgauern (ZAR, 2016). In 1.403 Herden stehen 9.860 Herdebuchkühe. Die durchschnittliche Milchleistung bei 5.929 Vollabschlüssen der Herdebuchkühe betrug 2016 5.783 kg Milch bei 3,88 % Fett und 3,28 % Eiweiß (ZAR, 2016).

Seit 1969 werden die Pinzgauer zum Teil mit Red Friesian-Tieren eingekreuzt, um die Milchleistung und die Euterqualität der Kühe zu verbessern (Stöckl, 2014). Weibliche Tiere mit einem Fremdgenanteil bis zu 6,25 % zählen als reinrassig. Seit 2017 zählen nur noch Stiere bis zu einem Red Holstein-Anteil von 3,125 % als reinrassig (Deutinger, 2015).

2.2 Milchprotein

Das Milcheiweiß ist ein wichtiger Bestandteil in der Milch und hat einen Gehalt von circa 3,3 %. Das Rohprotein kann in Reinprotein und Nicht-Protein-Stickstoff unterteilt werden, wobei das Reinprotein einen Anteil von ungefähr 95 % und der Nicht-Protein-Stickstoff von circa 5 % aufweist. Das Reinprotein wiederum wird in Caseine und Molkenproteine gegliedert, wobei die Caseine circa 80 % und die Molkenproteine 20 % ausmachen (Mayer, s.a.).

2.3 Casein

Das Casein wird in vier Caseine unterteilt: α_{s1} -, α_{s2} -, β - und κ -Caseine. Bei jedem Casein gibt es jeweils verschiedene genetische Varianten (Swaisgood, 1992). Die vier Caseine befinden sich am Chromosom 6 in folgender Reihenfolge: α_{s1} -, β -, α_{s2} - und κ -Casein und liegen eng beieinander (weniger als 200 kb auf der DNA) (Threadgill und Womack, 1990).

2.3.1 α_{s1} -Casein

Das α_{s1} -Casein bildet circa 40 % des Caseins (Farrell et al., 2004) und weist zehn verschiedene genetische Varianten (A, B, C, D, E, F, G, H, I, J) (Caroli et al., 2009; Gallinat et al., 2013) auf, wobei die Varianten B und C am häufigsten vorkommen (Farrell et al., 2004). Das Referenzweiß beim α_{s1} -Casein ist die Variante B und hat 199 Aminosäuren. Bei der Variante A fehlen 13 Aminosäuren (Position 14 bis 26) im Vergleich zur Variante B. Zwischen Variante B und C gibt es an der Position 192 einen Unterschied, bei der Variante B liegt an dieser Position Glutaminsäure vor, während Variante C die Aminosäure Glycin kodiert (Farrell et al., 2004).

2.3.1.1 Verteilung der α_{s1} -Casein-Varianten bei verschiedenen Rinderrassen

Bei den Rinderrassen Braunvieh, Fleckvieh, Tiroler Grauvieh, Holstein und Pinzgauer tritt jeweils die Variante B am häufigsten auf.

α_{s1} -Casein-Varianten bei der Rasse Pinzgauer

Bei der Rasse Pinzgauer treten die Varianten B und C auf. Bei bisherigen Untersuchungen wurden Frequenzen für die Variante B in der Höhe von 72,1 % bis 75,2 % und für die Variante C von 24,8 % bis 27,9 % festgestellt (Buchberger et al., 1996; Erhardt, 1996; Mayer et al., 1997; Caroli et al., 2010). Bei Buchberger et al. (1996) wiesen 58,01 % der Tiere den Genotyp BB, 34,3 % den Genotyp BC und 7,69 % den Genotyp CC auf. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der bisherigen Studien dargestellt.

Tabelle 1: Allelfrequenzen der α_{s1} -Casein-Varianten in verschiedenen Untersuchungen beim Pinzgauer-Rind

Untersuchte Tiere	Variante B	Variante C	Studie
309	75,2 %	24,8 %	Buchberger et al. (1996)
353	72,1 %	27,9 %	Erhardt (1996)
200	74,8 %	25,2 %	Mayer et al. (1997)
485	73,0 %	27,0 %	Caroli et al. (2010)

α_{s1} -Casein-Varianten bei der Rasse Fleckvieh

Das Fleckvieh hatte in einer österreichischen Studie Frequenzen von 87,8 % für das B-Allel und 12,2 % für das C-Allel (Mayer et al., 1997). Die Allelfrequenzen für tschechisches Fleckvieh lagen mit 89,3 % für B und 10,7 % für C in einem ähnlichen Bereich. Insgesamt 80,2 % der Tiere wiesen dabei den Genotyp BB auf, 18,2 % trugen den Genotyp BC und nur 1,6 % der Tiere waren reinerbig CC (Kučerová et al., 2006).

α_{s1} -Casein-Varianten bei der Rasse Holstein

Bei der Rasse Holstein ist fast ausschließlich das B-Allel zu finden. In einer älteren Studie von Ng-Kwai-Hang et al. (1984) wurde neben den Varianten B (vorherrschend mit 97 %) und C (2,7 %) auch die Variante A festgestellt (0,3 %). Bei einer österreichischen Untersuchung lag ebenfalls fast ausschließlich die Variante B vor (96,8 %), Variante C kam zu 3,2 % vor und Variante A trat nicht auf (Mayer et al., 1997). Fast ausnahmslos vorhanden war die B-Variante in aktuelleren Studien mit 99,5 % bzw. 99,7 % bei Holstein-Kühen, die Variante C trat mit 0,3 % bzw. 0,5 % dagegen sehr selten auf (Heck et al., 2009; Gustavsson et al., 2014). In den Studien mit ausgewiesenen Genotypen kamen keine homozygoten CC-Tiere vor (Ng-Kwai-Hang et al., 1984; Mayer et al., 1997; Gustavsson et al., 2014).

α_{s1} -Casein-Varianten bei der Rasse Braunvieh

In einer Publikation mit Brown Swiss wurden Allelfrequenzen in der Höhe von 97,3 % für die Variante B und 2,7 % für die Variante C festgestellt. 94,78 % der Tiere hatten den Genotyp BB, nur 0,1 % der Tiere trugen den Genotyp CC (Kim et al., 1998). In einer österreichischen Arbeit betragen die Frequenzen für Variante B 93,2 %, für Variante C 6,7 % und für Variante A 0,1 % (Mayer et al., 1997).

α_{s1} -Casein-Varianten bei der Rasse Tiroler Grauvieh

Beim Tiroler Grauvieh konnten Allelfrequenzen der α_{s1} -Casein-Variante B von 79,2 % und für C von 20,8 % festgestellt werden (Mayer et al., 1997).

α_{s1} -Casein-Varianten bei der Rasse Jersey

Bei einer österreichischen Untersuchung von Jerseys lag die Frequenz für die Variante B bei 66,3 %, während jene von Variante C 33,7 % betrug (Mayer et al., 1997). In einer älteren Studie

mit dänischen Jerseys betrug die Allelfrequenz der α_{s1} -Casein-Variante B 70 % und die der α_{s1} -Casein-Variante C 30 % (Bech und Kristiansen, 1990), wobei sich bei einer neueren Untersuchung mit dänischen Jerseys die Allelfrequenz der α_{s1} -Casein-Variante B auf 57,2 % verminderte und sich die C-Variante auf 42,8 % erhöhte (Gustavsson et al., 2014).

α_{s1} -Casein-Varianten bei weiteren Rassen

Bei den Schwedischen Rotbunten kam mit 99,6 % fast ausschließlich die Variante B und mit 0,4 % die Variante C sehr selten vor (Gustavsson et al., 2014). Die Rasse Guernsey (n = 40) wies eine Allelfrequenz für die Variante B von 88 % und für die Variante C von 12 % auf (Van Eenennaam und Medrano, 1991).

2.3.1.2 Zusammenhänge von α_{s1} -Casein-Varianten und Produktionsmerkmalen

In der Literatur finden sich hier zum Teil widersprüchliche Ergebnisse. Ng-Kwai-Hang et al. (1984) fanden einen Zusammenhang zwischen den genetischen Varianten und Milchleistungsmerkmalen. Die Milch-, Fett- und Eiweißmenge von 1687 Holstein-Kühen in der ersten Laktation war höher, wenn sie den Genotyp BB des α_{s1} -Caseins trugen, bei Erstlingskühen mit dem Genotyp AB war sie am geringsten (Ng-Kwai-Hang et al., 1984). Auch Aleandri et al. (1990) fanden einen Zusammenhang: Holstein-Kühe mit dem Genotyp BB hatten eine höhere Milchmenge, eine höhere Fettmenge und auch eine etwas höhere Eiweißmenge als Kühe mit dem Genotyp BC. Tiere mit dem Genotyp BC wiesen dafür einen signifikant höheren Eiweißgehalt auf (Aleandri et al., 1990). Kim et al. (1998) wiederum konnten bei Brown Swiss keinen signifikanten Einfluss der genetischen Varianten auf die Milch-, Fett- und Eiweißmenge und den Fett- und Eiweißgehalt feststellen.

Aleandri et al. (1990) untersuchten die Käseausbeute pro Laktation und der Genotyp BB hatte einen größeren Ertrag als der Genotyp BC, was die Autoren durch die höhere Milch-, Fett- und Eiweißmenge der BB-Kühe begründeten. Die Variante C wurde aber mit signifikant höherer Gallertfestigkeit und kürzerer Gerinnungszeit als Variante B bei dänischen Jerseys in Verbindung gebracht (Poulsen et al., 2013). Eine kürzere Gerinnungszeit bei Variante C im Vergleich zu Variante B beschrieben auch Buchberger et al. (1996). Der Genotyp BC wies in der Arbeit von Ketto et al. (2017), in der Norwegische Rotbunte untersucht wurden, ebenfalls bessere Labgerinnungseigenschaften auf als der Genotyp BB.

2.3.2 α_{s2} -Casein

Das α_{s2} -Casein hat einen Anteil von 10 % am Casein und es liegen fünf genetische Varianten (A, B, C, D, E) vor (Farrell et al., 2004; Gallinat et al., 2013). Die α_{s2} -Casein-Variante A ist das Referenziweiß und ist aus 207 Aminosäuren aufgebaut. Die Variante A tritt am häufigsten auf (Farrell et al., 2004). Bei der Rasse Pinzgauer traten in früheren Studien nur die Varianten A und B auf (Caroli et al., 2010; Gallinat et al., 2013), wobei die Frequenz für Variante A mit 79,8 % ebenso wesentlich höher war als für Variante B mit 20,2 % (Caroli et al., 2010).

2.3.3 β -Casein

Bei den β -Caseinen (bis zu 45 % des Caseins) gibt es 15 verschiedene genetische Varianten (A1, A2, A3, B, C, D, E, F, G, H1, H2, I, J, K, L) (Farrell et al., 2004; Gallinat et al., 2013), wobei die Varianten A1, A2 und B am häufigsten vorkommen (Farrell et al., 2004). Das β -Casein ist aus 209 Aminosäuren aufgebaut und das Referenziweiß ist das A2-Allel. Die Varianten unterscheiden sich von der Variante A2 durch ein oder mehrere unterschiedliche Aminosäuren an verschiedenen Positionen. Der Unterschied zwischen der Variante A1 und A2 liegt nur bei einer Aminosäure – an der Position 67 ist bei der A2-Milch (Wildtyp) die Aminosäure Prolin und bei der A1-Milch die Aminosäure Histidin. Die Allele B, C, F und G haben an dieser Stelle ebenfalls Histidin und sind somit A1-ähnlich. Diese Varianten unterscheiden sich an einer anderen Position/anderen Positionen von der Variante A1. Bei den Varianten A3, D, E, H2 und I liegt an der Stelle 67 die Aminosäure Prolin und sie sind deshalb A2-ähnlich, ein Unterschied dieser Varianten besteht an einer anderen Position (Farrell et al., 2004; Caroli et al., 2009).

2.3.3.1 Verteilung der β -Casein-Varianten bei verschiedenen Rinderrassen

β -Casein-Varianten bei der Rasse Pinzgauer

In bisherigen Arbeiten mit Pinzgauern aus Österreich und Bayern wurden die Varianten A1, A2, B und C festgestellt, wobei die Allelfrequenz der Variante A2 am höchsten war, sie lag zwischen 55,3 % und 59 %. Die Variante A1 war mit einer Frequenz von 31,7 % bis 36,5 % die zweithäufigste Variante. Die Varianten B (1,5 % bis 4 %) und C (4,2 % bis 5,6 %) traten wesentlich seltener auf (Buchberger et al., 1996; Erhardt, 1996; Mayer et al., 1997; Caroli et

al., 2010). Der Genotyp A2A2 kam in der Studie von Buchberger et al. (1996) mit 36,86 % am häufigsten vor, gefolgt von A1A2 mit 33,01 %. In einer Publikation mit slowakischen Pinzgauer-Rindern war es umgekehrt: Die Allelfrequenz der Variante A1 war mit 56,18 % am häufigsten, während die der Variante A2 auf 43,82 % kam. Der Genotyp A2A2 trat lediglich mit einer Frequenz von 17,98 % auf, am häufigsten vorzufinden war der Genotyp A1A2 mit 51,68 % (Miluchová et al., 2014). Die nachfolgende Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die bisherigen Studien.

Tabelle 2: Allelfrequenzen der β -Casein-Varianten in verschiedenen Untersuchungen beim Pinzgauer-Rind

Untersuchte Tiere	Variante A1	Variante A2	Variante B	Variante C	Studie
309	31,7 %	59,0 %	4,0 %	5,3 %	Buchberger et al. (1996)
353	35,7 %	57,1 %	2,8 %	4,4 %	Erhardt (1996)
200	36,5 %	55,3 %	4,0 %	4,2 %	Mayer et al. (1997)
485	35,7 %	57,2 %	1,5 %	5,6 %	Caroli et al. (2010)
89	56,18 %	43,82 %	-	-	Miluchová et al. (2014)

β -Casein-Varianten bei der Rasse Fleckvieh

Bei einer Untersuchung aus den 1990er Jahren in Österreich betragen die Frequenzen für das Fleckvieh für die Variante A2 68,5 %, für die Variante A1 21,6 %, für die Variante B 8,3 %, für A3 0,3 % und für C 1,3 % (Mayer et al., 1997). In einer italienischen Studie lagen die Allelfrequenzen für Variante A2 bei 59,6 %, für Variante A1 bei 18,8 %, für Variante B bei 15,8 % und für Variante I bei 5,8 %. Der Anteil der Kühe mit dem Genotyp A2A2 betrug 36,2 % (Bonfatti et al., 2010). Bei tschechischem Fleckvieh lag die Allelfrequenz für die Variante A2 mit 80,9 % in einem sehr hohen Bereich, die Variante A1 wies 17,7 % auf. Die Varianten A3 und B wurden mit jeweils 0,6 % und 0,8 % selten festgestellt (Kučerová et al., 2006). Der Genotyp A2A2 wurde mit 64,7 % am häufigsten nachgewiesen, gefolgt vom Genotyp A1A2 mit 29,7 % und A1A1 mit 2,8 % (Kučerová et al., 2006).

β -Casein-Varianten bei der Rasse Holstein

Laut einer älteren Studie von Ng-Kwai-Hang et al. (1984) war die Frequenz für die Variante A1 am höchsten und lag bei 56,1 %, während sie für die Variante A2 42,1 % betrug. Die Varianten

B (0,7 %) und A3 (1,1 %) traten in niedriger Frequenz auf. Insgesamt 30,71 % der Tiere waren homozygot A1A1 und 16,63 % homozygot A2A2. In einer weiteren Analyse mit Holstein-Tieren war ebenfalls die Variante A1 vorherrschend (Aleandri et al., 1990). Bei einer österreichischen Untersuchung hingegen war das β -Casein-Allel A2 mit 55,1 % am häufigsten, das Allel A1 lag bei 40,3 %. Die Varianten A3, B und C kamen mit 1,9 %, 2,4 % und 0,3 % wesentlich seltener vor (Mayer et al., 1997). Die A2-Frequenz beläuft sich in neueren Studien auf über 60 % (Heck et al., 2009; Olenski et al., 2010 und Gustavsson et al., 2014). So berichteten Heck et al. (2009) für niederländische Holsteins von einer Allelfrequenz der Variante A2 von 69,2 %, die Variante A1 wurde mit einer Frequenz von 28,5 % nachgewiesen, A3 und B kamen mit 0,1 % und 2,2 % selten vor. In der Publikation von Visker et al. (2010) wurden ebenfalls niederländische Holsteins untersucht, jedoch wurde die Variante I im Gegensatz zur vorherigen Arbeit (Heck et al., 2009) von der Variante A2 unterschieden. Die Frequenz für A2 belief sich auf 50,4 %, für Variante I auf 19,2 %, für A1 auf 28,3 %, für B auf 2 % und für A3 auf 0,1 %. In der Studie von Gustavsson et al. (2014), in der dänische Holstein-Tiere untersucht wurden, lagen die Allelfrequenzen für A2 bei 61,4 %, für A1 bei 26,6 %, für I bei 7 % und für B bei 4,6 %. A3 kam mit 0,5 % sehr selten vor. Bei einer Untersuchung polnischer Stiere wurden die A1- und A2-Variante erhoben und die Allelfrequenzen lagen bei 65 % für A2 und 35 % für A1. Hinsichtlich der Genotypen waren 43,1 % der Tiere reinerbig A2A2 und 12,8 % der Stiere homozygot A1A1 (Olenski et al., 2010).

β -Casein-Varianten bei der Rasse Braunvieh

Bei Braunvieh in Österreich lagen die Frequenzen für A2 bei 71,3 %, für A1 bei 11,3 %, für B bei 16,4 % und die Variante C kam mit 1 % recht selten vor (Mayer et al., 1997). Eine weitere Arbeit mit Brown Swiss-Kühen aus Kanada ergab für die Variante A2 mit 51,8 % etwas geringere Frequenzen, Variante A1 trat mit einer Häufigkeit von 31,6 % auf, A3 und B kamen mit einer Frequenz von 0,5 % bzw. 16,1 % vor (Kim et al., 1998). Eine aktuelle Publikation mit slowenischem Braunvieh wies eine Allelfrequenz für A2 von 79,7 % auf. Der Genotyp-Anteil betrug 62,11 % für A2A2, den Genotyp A1A1 hatten lediglich 2,63 % (Potočnik et al., 2016).

β -Casein-Varianten bei der Rasse Tiroler Grauvieh

Das Tiroler Grauvieh zeigte bei einer Untersuchung mit 197 Tieren Allelfrequenzen für die Variante A2 von 61,2 %, für A1 von 12,4 %, für B von 21,8 % und für C von 4,6 % (Mayer et al., 1997).

β -Casein-Varianten bei der Rasse Jersey

Bei einer österreichischen Untersuchung mit Jerseys lagen die Frequenzen für die Variante A2 bei 71,2 %, für die Variante A1 bei 4,2 % und für die Variante B bei 24,6 % (Mayer et al., 1997). Bei dänischen Jerseys wurden im Jahr 1990 Frequenzen von 58 % für die Variante A2, 7 % für die Variante A1 und 35 % für die Variante B publiziert (Bech und Kristiansen, 1990). In den letzten zwei Jahrzehnten kam es zu leichten Änderungen in der Allelfrequenz. Gustavsson et al. (2014) berichteten von einer Erhöhung der Allelfrequenz der Variante A2 auf 63,4 %. Die Variante A1 blieb mit 8,1 % etwa gleich, die Variante B verringerte sich auf 21,8 % und die Variante I wurde ebenfalls nachgewiesen (6,7 %).

β -Casein-Varianten bei weiteren Rassen

Bei Schwedischen Rotbunten kam die Variante A2 mit 50,9 % vor, die Variante A1 hatte eine Frequenz von 48,2 % und die Variante B kam mit 0,9 % sehr selten vor (Gustavsson et al., 2014). Bei einer kleinen Stichprobe (n = 40) konnte in einer älteren Arbeit bei der Rasse Guernsey mit 96 % fast ausschließlich die Variante A2 festgestellt werden, die Variante C trat in einer Höhe von 4 % auf und A1 wurde gar nicht festgestellt (Van Eenennaam und Medrano, 1991).

2.3.3.2 Zusammenhänge von β -Casein-Varianten und Produktionsmerkmalen

Studien, in denen Zusammenhänge zwischen Milchleistungsmerkmalen und genetischen Varianten des β -Caseins untersucht wurden, zeigen zum Teil unterschiedliche Ergebnisse. So konnten Kim et al. (1998) bei der Rasse Brown Swiss keinen signifikanten Zusammenhang zwischen den genetischen Varianten auf die Milch-, Fett- und Eiweißmenge sowie den Fett- und Eiweißprozenten feststellen.

Ng-Kwai-Hang et al. (1984) berichteten bei untersuchten Holstein-Kühen jedoch von einem leicht positiven Effekt der Variante A2 im Vergleich zur Variante A1 auf die Milchmenge. Bech

und Kristiansen (1990) zeigten für die untersuchten Rassen (Dänische Rote und Dänische Schwarzbunte), dass der Genotyp A2A2 im Vergleich zum Genotyp A1A1 einen positiven Einfluss auf die Eiweißmenge in der ersten sowie auf Milch-, Fett- und Eiweißmenge in der zweiten Laktation hat. Ebenfalls höhere Milch- und Eiweißmengen für Kühe mit dem Genotyp A2A2 stellten Ikonen et al. (1999) bei Finnish Ayrshire fest. Der Fettgehalt war dafür bei Tieren des Genotyps A1A1 höher. Die Variante A2 steht damit in positivem Zusammenhang mit einer höheren Milch- und Eiweißmenge, während die Variante A1 den Fettgehalt positiv beeinflusst (Ikonen et al., 1999). Niederländische Holstein-Kühe mit der Variante A2 zeigten eine höhere Proteinmenge als Kühe mit der Variante A1, die eine geringere Milchleistung aufwiesen (Heck et al., 2009).

Auf Basis der Zuchtwerte wurde festgestellt, dass Holstein-Stiere mit der Variante A2 im Vergleich zu jenen mit der Variante A1 einen höheren Zuchtwert für Milch- und Eiweißmenge aufweisen, dafür aber einen geringeren Zuchtwert für den Fettgehalt (Olenski et al., 2010). In einer weiteren Studie wiederum wiesen Fleckvieh-Tiere aus Tschechien mit dem Genotyp A2A2 im Durchschnitt einen negativen Zuchtwert und Tiere mit dem Genotyp A1A1 einen positiven Zuchtwert für die Milchmenge aus. Die Zuchtwerte für Fett- und Eiweißgehalt waren dafür im Schnitt bei den Tieren mit dem Genotyp A2A2 höher als bei jenen mit dem Genotyp A1A1 (Kučerová et al., 2006).

Bezüglich der Käseereitauglichkeit zeigte die Variante A2 im Vergleich zur Variante A1 eine signifikant längere Labgerinnungszeit und niedrigere Gallertfestigkeit bei dänischen Holsteins (Poulsen et al., 2013). Die Variante B hatte eine signifikant kürzere Labgerinnungszeit und höhere Gallertfestigkeit als Variante A1 (Poulsen et al., 2013). Ebenfalls bessere Labgerinnungseigenschaften für die Variante A1 im Vergleich zur Variante A2 wurden bei einer Untersuchung von Norwegischen Roten festgestellt (Ketto et al., 2017).

2.3.3.3 Einfluss des β -Caseins auf die Gesundheit des Menschen

In den letzten Jahren wird vermehrt über das Thema A2-Milch diskutiert. Die Variante A2 ist, wie schon eingangs erwähnt, eine von insgesamt 15 Varianten des β -Caseins (Farrell et al., 2004; Gallinat et al., 2013). Zwischen den Varianten A1 und A2 besteht nur ein Unterschied, an der Position 67 befindet sich bei der Variante A2 die Aminosäure Prolin und bei der Variante A1 die Aminosäure Histidin (Farrell et al., 2004). Varianten mit Histidin an Position 67 setzen

bei der Verdauung das Peptid Beta-Casomorphin 7 frei (Jinsmaa und Yoshikawa, 1999). Das Beta-Casomorphin 7 entsteht bei der A2-Milch nicht (De Noni, 2008) oder nur in geringer Menge (Cieślińska et al., 2007). Die Varianten B, C, F und G weisen an dieser Position ebenfalls die Aminosäure Histidin auf (Farrell et al., 2004). Das Peptid Beta-Casomorphin 7 wird bei einigen Untersuchungen als Risikofaktor für gewisse Krankheiten genannt und mit Verdauungsbeschwerden in Zusammenhang gebracht (Elliott et al., 1999; McLachlan, 2001; Ho et al., 2014; Jianqin et al., 2016; He et al., 2017).

Die Variante A1 wird mit Krankheiten wie Diabetes mellitus Typ 1 und Herzerkrankungen in Verbindung gebracht (Elliott et al., 1999; McLachlan, 2001). Eine hohe Korrelation zwischen dem Auftreten von Diabetes mellitus Typ 1 und dem Konsum von Milch mit den Varianten A1 und B konnten Elliott et al. (1999) feststellen, die Korrelation war höher, wenn die Variante B zusätzlich zur Variante A1 inkludiert war (Elliott et al., 1999). Die Variante B hat an der Position 67 ebenfalls die Aminosäure Histidin (Farrell et al., 2004). McLachlan (2001) berichtete von einem starken Zusammenhang zwischen Diabetes mellitus Typ 1 und der β -Casein-Variante A1. Er fand auch eine hohe Korrelation zwischen dem Auftreten von Herzerkrankungen und dem Konsum von Milch mit der Variante A1, wobei das Milcheiweiß in Käse nicht miteinbezogen wurde (McLachlan, 2001). Der Länder-Vergleich, der in beiden Studien durchgeführt wurde (Elliott et al., 1999 und McLachlan, 2001), wurde aber in einer anderen Arbeit kritisiert, da eine geringe Anzahl an Ländern miteinbezogen wurde und zum Beispiel die Zuordnung, ob jene Personen mit Diabetes mellitus Typ 1 auch A1-Milch konsumierten, fehlt (Truswell, 2005). Für den Autor gibt es daher keine eindeutigen Beweise, dass die A1-Milch ein Risikofaktor für Diabetes mellitus Typ 1 und Herzerkrankungen ist (Truswell, 2005). Die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) überprüfte die vorhandene wissenschaftliche Literatur und konnte ebenfalls keine ausreichenden Beweise für einen Zusammenhang zwischen dem Konsum von A1-Milch und Erkrankungen wie Diabetes mellitus Typ 1 und Herzerkrankungen feststellen (EFSA, 2009).

Kamiński et al. (2012) untersuchten bei Ferkeln, ob der Verzehr von A1- oder A2-Milch Parameter im Blut beeinflusst. Die Menge an freigesetztem Beta-Casomorphin 7 war bei dieser Studie bei der A1-Milch ebenfalls höher als bei der A2-Milch, bei den untersuchten Parametern im Blut wurden aber keine signifikanten Unterschiede zwischen dem Verzehr der A1- und der A2-Milch festgestellt (Kamiński et al., 2012).

In den letzten Jahren hat sich der Fokus vieler wissenschaftlicher Arbeiten im Zusammenhang mit A2-Milch auf das Thema der Milchunverträglichkeiten verschoben. Bei einem Tierversuch mit Mäusen gab es Hinweise, dass die A1-Milch Entzündungsreaktionen im Darm verursacht (Ul Haq et al., 2014). Drei Humanstudien befassten sich mit Unterschieden in der Verdauung (Ho et al., 2014; Jianqin et al., 2016; He et al., 2017). In einer dieser Arbeiten mit 36 abgeschlossenen Teilnehmern konnte festgestellt werden, dass die Stuhlkonsistenz (Bewertung nach der Bristol-Stuhlformen-Skala, die von eins bis sieben geht (O'Donnell et al., 1990)) beim Konsum der A1-Milch signifikant höher und somit weicher war als beim Konsum der A2-Milch ($p = 0,04$). Beide Werte auf der Skala lagen aber in einem guten Bereich (3,87 für A1 und 3,56 für A2) (Ho et al., 2014). Verdauungsbeschwerden waren beim Konsum von A1-Milch höher, die Werte unterschieden sich aber nicht signifikant. Unterstützt wurde diese Studie durch das Tochterunternehmen A2 Dairy Products Australia (Ho et al., 2014). In einer weiteren Humanstudie nahmen 45 Probanden, die aus China stammten und vorher angaben, dass sie Milch nicht gut vertragen, teil. Der Konsum von Milch, die die Variante A1 enthielt, führte im Vergleich zum Konsum von A2-Milch vermehrt zu Verdauungsbeschwerden. Probanden, die eine bestätigte Laktoseintoleranz hatten, hatten beim Konsum von der A2-Milch weniger Beschwerden. Der Laktosegehalt in der Milch war bei der Milch, die A1-Milch enthielt und bei der A2-Milch jeweils gleich hoch (4,8 %) (Jianqin et al., 2016). In der Humanstudie von He et al. (2017) tranken 600 Teilnehmer aus China im Abstand von einer Woche einmal Milch, die die Varianten A1 und A2 enthielt und einmal A2-Milch und beurteilten nach dem Konsum der Milch anhand einer Skala von 0 bis 9 die Symptome. Die Probanden hatten eine selbst diagnostizierte Laktoseintoleranz. Symptome, wie Magenknurren, Blähungen, Bauchschmerzen, Stuhlfrequenz und Stuhlkonsistenz waren nach ein und drei Stunden im Vergleich zu A2-Milch signifikant höher beim Konsum von Milch, die die Varianten A1 und A2 enthielt. Das Ergebnis, dass die A2-Milch von Personen mit selbst diagnostizierter Laktoseintoleranz besser verträglich ist als Milch mit den Varianten A1 und A2, lässt die Autoren vermuten, dass es bei einigen Teilnehmern nicht an der Laktose, sondern an der β -Casein-Variante A1 liegt (He et al., 2017). Diese beiden Humanstudien wurden von der a2 Milk Company Limited finanziert (Jianqin et al., 2016; He et al., 2017).

Das Max-Rubner-Institut ist das deutsche Bundesforschungsinstitut für Ernährung und Lebensmittel und bewertete 2016 ebenfalls die vorhandene Literatur. Es kritisierte, dass die Humanstudien von der a2 Milk Company finanziell unterstützt wurden und teilte mit, dass

trotz neuer Humanstudien die Bewertung der EFSA nicht geändert werden muss (Max-Rubner-Institut, 2016).

Die Diskussion zur A2-Milch geht vor allem von Neuseeland aus, dort wurde im Jahr 2000 die a2 Milk Company gegründet und Milch als A2-Milch vermarktet (a2 Milk Company, s.a.). Die A2-Milch dieses Unternehmens ist aktuell in Neuseeland, Australien, USA, Großbritannien und China erhältlich (a2 Milk Company, s.a.).

2.3.4 κ -Caseine

Beim κ -Casein liegen vierzehn bekannte genetische Varianten (A, A1, B, B2, C, D, E, F1, F2, G1, G2, H, I, J) vor (Caroli et al., 2009), wobei die Varianten A und B die häufigsten sind (Farrell et al., 2004). Das κ -Casein besteht aus 169 Aminosäuren, das Referenzprotein ist die Variante A (Farrell et al., 2004). Die Variante B unterscheidet sich durch zwei Aminosäuren von Variante A (Farrell et al., 2004). Die Variante G wurde bei Pinzgauern nachgewiesen (Erhardt, 1996). Die Variante E wurde bei Deutschen Rotbunten, Deutschen Schwarzbunten und Anglern gefunden (Erhardt, 1989) und sie unterscheidet sich von Variante A durch eine Aminosäure. An der Position 155 liegt bei der Variante A die Aminosäure Serin vor, während bei der Variante E Glycin in der DNA kodiert ist (Farrell et al., 2004). Die Variante E ist bei Pinzgauern auf die Einkreuzung mit Red Holstein zurückzuführen (Erhardt, 1996).

2.3.4.1 Verteilung der κ -Casein-Varianten bei verschiedenen Rinderrassen

κ -Casein-Varianten bei der Rasse Pinzgauer

Bei der Rasse Pinzgauer wurden Frequenzen für die Variante A von 72,8 % bis 78,3 % und für B von 21,1 % bis 26,6 % festgestellt (Buchberger et al., 1996; Erhardt, 1996; Mayer et al., 1997; Caroli et al., 2010). Die Variante E lag zwischen 0,3 % und 1,8 % (Erhardt, 1996; Mayer et al., 1997; Caroli et al., 2010). Die Variante G war bei 0,3 % (Erhardt, 1996). Bei der Untersuchung von Caroli et al. (2010) wurde die Variante G überhaupt nicht nachgewiesen. Bei einer kleinen Stichprobe von Pinzgauern (n = 17) wurde auch die κ -Casein-Variante H festgestellt (Gallinat et al., 2013).

Bei Buchberger et al. (1996) wiesen lediglich 5,45 % den Genotyp BB auf, 37,82 % der Tiere waren heterozygot AB und 56,73 % reinerbig AA. Die folgende Tabelle 3 stellt die Ergebnisse der bisherigen Studien dar.

Tabelle 3: Allelfrequenzen der κ -Casein-Varianten in verschiedenen Untersuchungen beim Pinzgauer-Rind

Untersuchte Tiere	Variante A	Variante B	Variante E	Variante G	Variante C	Studie
309	75,6 %	24,4 %	-	-	-	Buchberger et al. (1996)
353	78,3 %	21,1 %	0,3 %	0,3 %	-	Erhardt (1996)
200	74 %	24 %	1,8 %	-	0,2 %	Mayer et al. (1997)
485	72,8 %	26,6 %	0,6 %	-	-	Caroli et al. (2010)

κ -Casein-Varianten bei der Rasse Fleckvieh

In einer österreichischen Arbeit mit Fleckvieh betrug die Frequenz für Variante A 69,7 %, Variante B wies eine Frequenz von 28,6 % auf und Variante C von 1,7 % (Mayer et al., 1997). In einer italienischen Studie mit Fleckvieh lagen die Allelfrequenzen bei 65,2 % für die A-Variante und bei 34,8 % für die B-Variante. Hinsichtlich der Genotypen waren 43,8 % der Tiere homozygot AA, 13 % homozygot BB und 43,2 % heterozygot AB (Bonfatti et al., 2010). Bei tschechischem Fleckvieh wurden die Allelfrequenzen beim κ -Casein mit 59,8 % für Variante A, 37,8 % für Variante B und 2,4 % für Variante E festgestellt. Insgesamt 35,4 % der Tiere hatten den Genotyp AA und 13 % den Genotyp BB, 46,8 % waren mischerbig AB (Kučerová et al., 2006).

κ -Casein-Varianten bei der Rasse Holstein

Bei der Rasse Holstein lagen die Allelfrequenzen für die κ -Casein-Variante A bei 74,4 % und für die Variante B bei 25,6 % (Ng-Kwai-Hang et al., 1984). In einer weiteren Studie mit Holstein war ebenfalls die Variante A vorherrschend (Aleandri et al., 1990). Im Rahmen einer österreichischen Untersuchung von Holstein-Kühen betrug die Frequenzen für die Variante A 84,3 %, für die Variante B 9,2 % und für C und E jeweils 1,1 % bzw. 5,4 % (Mayer et al., 1997). In neueren Publikationen zu dänischen Holsteins lagen Frequenzen von 59,9 % bis 69,7 % für Variante A, 23,9 % bis 30,9 % für Variante B und 6,4 % bis 9,2 % für Variante E vor (Heck et al., 2009; Gustavsson et al., 2014).

κ -Casein-Varianten bei der Rasse Braunvieh

Die κ -Casein-Variante A kam in einer Arbeit von Brown Swiss in Kanada mit einer Häufigkeit von 70,4 % vor, die Variante B mit 29,3 % und die Variante C mit 0,3 %. Die Genotypfrequenz

der Kühe betrug 48,04 % für den Genotyp AA, 44,11 % für den Genotyp AB und 7,27 % für den Genotyp BB (Kim et al., 1998). Bei einer österreichischen Untersuchung von Braunvieh wurden folgende Frequenzen festgestellt: Variante B war mit 59,2 % am häufigsten, gefolgt von Variante A mit 39,9 % und Variante C mit 0,9 % (Mayer et al., 1997). Bei den untersuchten Brown Swiss in Kanada war somit die Variante A vorherrschend (Kim et al., 1998), während bei österreichischem Braunvieh die Variante B am häufigsten war (Mayer et al., 1997).

κ-Casein-Varianten bei der Rasse Tiroler Grauvieh

Beim Tiroler Grauvieh war die Allelfrequenz für Variante A mit 54,1 % am höchsten, die Variante B trat mit 45,2 % im Vergleich zu den Rassen Fleckvieh, Holstein und Pinzgauern häufiger auf. Variante C wurde mit 0,7 % selten nachgewiesen (Mayer et al., 1997).

κ-Casein-Varianten bei der Rasse Jersey

Eine österreichische Publikation aus den 1990er Jahren zeigte Frequenzen in der Höhe von 65,8 % für die Variante B und 34,2 % für die Variante A (Mayer et al., 1997). Bei dänischen Jerseys dominierte ebenfalls die Variante B mit 69 %, Variante A wies 31 % auf (Bech und Kristiansen, 1990). In einer aktuelleren Arbeit kam die Variante B mit 79,4 % weitaus am häufigsten vor, während die Variante A auf 20,6 % kam (Gustavsson et al., 2014).

κ-Casein-Varianten bei weiteren Rassen

Bei Schwedischen Rotbunten kam die Variante A mit 62 % am häufigsten vor, gefolgt von Variante E mit 21,9 % und B mit 16 % (Gustavsson et al., 2014). Bei der Rasse Guernsey lag der Anteil der κ-Casein-Variante A bei 73 % und der Anteil der Variante B bei 27 % (Van Eenennaam und Medrano, 1991).

2.3.4.2 Zusammenhänge von κ-Casein-Varianten und Produktionsmerkmalen

Ng-Kwai-Hang et al. (1984) konnten bei Holstein-Kühen in der ersten Laktation keinen Zusammenhang zwischen den verschiedenen genetischen Varianten des κ-Caseins und der Milchmenge feststellen, jedoch hatten Kühe mit dem κ-Casein-Genotyp BB einen höheren Proteingehalt als Kühe mit dem κ-Casein-Genotyp AA. Kühe mit dem Genotyp AB beim κ-Casein lagen dazwischen. Weitere Studien belegten ebenfalls, dass die Milch von Kühen mit

dem Genotyp BB einen höheren Proteingehalt aufwies (Aleandri et al., 1990; Heck et al., 2009). Bei untersuchten Brown Swiss aus Kanada hatten die genetischen Varianten keinen signifikanten Einfluss auf die Milchmenge und Milchinhaltsstoffe, ein signifikanter Einfluss wurde nur in der ersten Laktation auf die Fett- und Eiweißmenge festgestellt. In der ersten Laktation hatten Kühe mit dem Genotyp AA eine höhere Fett- und Eiweißmenge als Kühe mit dem Genotyp AB bzw. BB. In der zweiten bzw. dritten Laktation produzierten jedoch Kühe mit dem Genotyp BB höhere Fett- und Eiweißmengen, dieses Ergebnis konnte aber nicht statistisch abgesichert werden (Kim et al., 1998). Tsiaras et al. (2005) stellten einen signifikanten Unterschied bei Proteinmenge und -gehalt fest, wobei sie bei Holstein-Kühen mit dem Genotyp AB signifikant höher waren als bei jenen mit dem Genotyp AA. Unterschiede in der Milch- und Fettmenge sowie dem Fettgehalt waren nicht signifikant (Tsiaras et al., 2005). Ebenfalls kein Einfluss der verschiedenen Genotypen auf die Milchleistung wurde bei einer Untersuchung von Finnish Ayrshire festgestellt, aber die Genotypen AB und BB zeigten einen höheren Proteingehalt der Milch, während die Variante E schlechtere Proteingehalte bildete (Ikonen et al., 1999). Träger der κ -Casein-Variante B wiesen auch bei Ikonen et al. (2001) einen höheren Proteingehalt als Träger der Variante E auf (Ikonen et al., 2001). Beim tschechischen Fleckvieh wiesen Tiere mit dem Genotyp BB durchschnittlich den höchsten Zuchtwert für den Eiweißgehalt auf, der Unterschied im Vergleich zur Variante AB war signifikant und betrug 0,019 Protein-% (Kučerová et al., 2006).

Milcheiweißvarianten haben einen Einfluss auf die Käseereitauglichkeit (Schaar et al., 1985). Der Genotyp BB führte zu größerer Käseausbeute (Aleandri et al., 1990). Die Variante B zeigte eine höhere Festigkeit der Gallerte und eine kürzere Labgerinnungszeit als Variante A. Die Variante B hatte einen signifikant höheren Caseingehalt als Variante A (Schaar, 1984). Heck et al. (2009) stellten fest, dass der Anteil am κ -Casein beim Genotyp BB höher als bei AA war. Auch bei Wedholm et al. (2006) war die κ -Caseinkonzentration beim Genotyp AB signifikant höher als bei AA. Bei niedriger κ -Caseinkonzentration und niedrigem Verhältnis von κ -Casein in Relation zum Gesamtcasein zeigte sich eine schlechte Gerinnung der Milch (Wedholm et al., 2006). Die Labgerinnungseigenschaften, Gerinnungszeit, Verfestigungszeit und Gallertfestigkeit waren beim κ -Casein-Genotyp BB signifikant höher als bei AA (Kübarsepp et al., 2005). Im Vergleich zur Variante A zeigte die Variante B eine signifikant kürzere Labgerinnungszeit und eine höhere Gallertfestigkeit (Poulsen et al., 2013).

2.3.5 Casein-Haplotypen

Die vier Caseine sind am Chromosom 6 lokalisiert und liegen eng beieinander (weniger als 200 kb auf der DNA) (Threadgill und Womack, 1990). Heck et al. (2009) beschreiben daher, dass eine Casein-Variante in einem Kopplungsungleichgewicht mit einer anderen Casein-Variante sein kann und dass es schwierig ist, zu bestimmen, ob der Effekt in Folge einer bestimmten Variante oder aufgrund einer Kopplung zu Varianten in anderen Caseingenen hervorgerufen wurde. Als Kopplungsungleichgewicht wird zum Beispiel das nicht unabhängige Auftreten von Casein-Genotypen an verschiedenen Casein-Genorten bezeichnet (Ng-Kwai-Hang et al., 1992). Kombinationen von Casein-Varianten, die gemeinsam vererbt werden, nennt man Casein-Haplotypen (Heck et al., 2009). Die Caseine α_{s1} -, β - und κ -Casein zeigten ein hohes Kopplungsungleichgewicht (Caroli et al., 2004). Ikonen et al. (1999) schreiben, dass die Betrachtung des Haplotyps β - und κ -Casein nicht außer Acht gelassen werden soll. Bei Heck et al. (2009) und Bonfatti et al. (2010) konnte eine Kopplung zwischen β - und κ -Casein festgestellt werden. Bei Bonfatti et al. (2010) wurde ebenfalls ein Kopplungsungleichgewicht zwischen κ -Casein und β -Lactoglobulin beobachtet. Das κ -Casein und das β -Lactoglobulin befinden sich aber nicht am gleichen Chromosom, wodurch das beobachtete Kopplungsungleichgewicht durch Zufall erklärt werden könnte (Bonfatti et al., 2010).

Milchleistungsmerkmale und Milcheiweißzusammensetzung wurden in der Arbeit von Heck et al. (2009) vom Casein-Haplotyp beeinflusst. So wurde bei den niederländischen Holstein-Kühen festgestellt, dass der Haplotyp A1-A (β - κ -Casein) zu einem höheren Fettgehalt, aber einer geringeren Milch- und Eiweißmenge führt und der Haplotyp A2-A in Zusammenhang mit einer besseren Milchleistung, aber einem geringeren Eiweißgehalt steht (Heck et al., 2009). Die Haplotypen A2-A und A2-B (β - und κ -Casein) zeigten bei der Rasse Finnish Ayrshire eine höhere Milch- und Eiweißmenge, dafür aber einen niedrigeren Fettgehalt. Träger der Haplotypen A1-A, A1-B und A1-E (β - und κ -Casein) wiesen eine geringere Milch- und Eiweißmenge, aber einen höheren Fettgehalt auf. Der Haplotyp A1-B zeigte einen höheren, der Haplotyp A1-E einen niedrigeren Proteingehalt (Ikonen et al., 2001). Die Autoren vermuten daher, dass die Milch- und Eiweißmenge sowie der Fettgehalt vom β -Casein beeinflusst wird und der Proteingehalt vom κ -Casein (Ikonen et al., 2001).

Bezüglich der Käseeritauglichkeit bewirkte der kombinierte Genotyp BB-A2A2-AA (α_{s1} -, β - und κ -Casein) bei den untersuchten Rassen Jersey, Dänische Rote und Dänische Schwarzbunte längere Labgerinnungszeiten und eine niedrigere Gallertfestigkeit und ist daher für die

Gerinnungseigenschaften eher ungünstig (Poulsen et al., 2013). Bei Ketto et al. (2017) zeigten die kombinierten α_{s1} - β - κ -Casein-Genotypen BC-A2A2-BB und BB-A1A2-AA im Vergleich zu den Genotypen BB-A2A2-BB, BB-A1A2-BE und BB-A2A2-AA bessere Labgerinnungseigenschaften. Säuregerinnungseigenschaften waren dafür beim kombinierten Genotyp BB-A2A2-AA besser. Die kombinierten Genotypen BB-A1A2-BE und BB-A2A2-BB (α_{s1} -, β - und κ -Casein) führten zu schlechten Lab- und Säuregerinnungseigenschaften (Ketto et al., 2017).

2.4 Molkenproteine

Einige bedeutende Molkenproteine sind das β -Lactoglobulin, das α -Lactalbumin, das Serumalbumin, Immunglobuline und das Laktoferrin. Das mengenmäßig häufigste Molkenprotein ist das β -Lactoglobulin (Farrell et al., 2004). Im folgenden Abschnitt wird auf das β -Lactoglobulin näher eingegangen.

2.4.1 β -Lactoglobulin

Das β -Lactoglobulin liegt am Chromosom 11 (Hayes und Petit, 1993) und es gibt elf verschiedene Varianten (A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, W), wobei die Varianten A und B am häufigsten auftreten. Das β -Lactoglobulin besteht aus 162 Aminosäuren. Varianten A und B unterscheiden sich durch zwei Aminosäuren (Farrell et al., 2004).

2.4.1.1 Verteilung der β -Lactoglobulin-Varianten bei verschiedenen Rassen

β -Lactoglobulin-Varianten bei der Rasse Pinzgauer

Die Variante B trat mit einer Allelfrequenz von 82 % bis 86 % am weitesten häufigsten auf, die Variante A kam in der Höhe von 14 % bis 18 % vor (Buchberger et al., 1996; Erhardt, 1996; Caroli et al., 2010). In der Publikation von Buchberger et al. (1996) wiesen 67,31 % der Tiere den Genotyp BB auf, 29,49 % waren mischerbig AB und lediglich 3,2 % zeigten den Genotyp AA. Die folgende Tabelle 4 gibt eine Übersicht der einzelnen Studien.

Tabelle 4: Allelfrequenzen der β -Lactoglobulin-Varianten in verschiedenen Untersuchungen beim Pinzgauer-Rind

Untersuchte Tiere	Variante A	Variante B	Studie
309	18 %	82 %	Buchberger et al. (1996)
353	16,7 %	83,3 %	Erhardt (1996)
485	14 %	86 %	Caroli et al. (2010)

β -Lactoglobulin-Varianten bei der Rasse Fleckvieh

Für das österreichische Fleckvieh berichteten Mayer et al. (1997) von Allelfrequenzen der Variante B von 52,7 %, der Variante A von 45,9 % und der Variante D von 1,4 %. Wie eine Untersuchung von Fleckvieh-Kühen in Italien zeigte, lagen die Allelfrequenzen für das β -Lactoglobulin mit 54,3 %, 44,9 % bzw. 0,8 % für die Varianten A, B bzw. D in einem ähnlichen Bereich. In der genannten Studie trugen 46,6 % der Tiere den Genotyp AB, 30,6 % wiesen den Genotyp AA sowie 21,3 % den Genotyp BB auf (Bonfatti et al., 2010). Bei tschechischem Fleckvieh wurden Allelfrequenzen von 51,1 % für Variante A und 48,9 % für Variante B nachgewiesen. Der Genotyp AB kam mit 49,8 % am häufigsten vor, gefolgt von AA mit 26,2 % und BB mit 24 % (Kučerová et al., 2006).

β -Lactoglobulin-Varianten bei der Rasse Holstein

Bei der Untersuchung von Ng-Kwai-Hang et al. (1984) war die Variante B bei Holsteins mit 61,3 % am häufigsten. Auch Aleandri et al. (1990) nannten Variante B als die häufigste β -Lactoglobulin-Variante. In einer neueren Arbeit trat jedoch Variante A mit 58,3 % häufiger auf als Variante B mit 41,7 % (Heck et al., 2009).

β -Lactoglobulin-Varianten bei der Rasse Braunvieh

In einer österreichischen Veröffentlichung zum Braunvieh betrug die Frequenzen für das B-Allel 58,1 %, für das A-Allel 41,8 % und für das D-Allel 0,1 % (Mayer et al., 1997). Bei kanadischen Brown Swiss kam ebenfalls die β -Lactoglobulin-Variante B mit 58,3 % häufiger vor als die Variante A (41,7 %). Der Genotyp AB wurde mit 56,05 % am häufigsten gefunden, die Genotypen AA und BB kamen zu 13,65 % bzw. 30,3 % vor (Kim et al., 1998).

β -Lactoglobulin-Varianten bei weiteren Rinderrassen

Bei kalifornischen Guernseys kam die β -Lactoglobulin-Variante B mit 79 % und die Variante A mit 21 % vor (Van Eenennaam und Medrano, 1991).

2.4.1.2 Zusammenhänge von β -Lactoglobulin-Varianten und Produktionsmerkmalen

Ng-Kwai-Hang et al. (1984) konnten bei der Rasse Holstein keine signifikanten Unterschiede in der Milchleistung zwischen Tieren mit den verschiedenen genetischen Varianten hinsichtlich des β -Lactoglobulins feststellen. Im Gegensatz dazu hatten Holstein-Kühe mit dem β -Lactoglobulin-Genotyp AA in der Studie von Aleandri et al. (1990) eine höhere Milchmenge als jene mit dem Genotyp BB, heterozygote Tiere (AB) lagen dazwischen. Tsiaras et al. (2005) kamen zum Ergebnis, dass Holstein-Kühe mit dem Genotyp AB eine signifikant höhere Milchleistung aufwiesen als jene mit dem Genotyp AA. Die Fettmenge war bei Kühen mit den Genotypen AB und BB signifikant höher als bei Tieren mit dem Genotyp AA. Beim Eiweißgehalt und der Eiweißmenge wurden keine signifikanten Unterschiede gefunden (Tsiaras et al., 2005). Bei Aleandri et al. (1990) wiesen Kühe mit dem Genotyp AA jedoch eine höhere Proteinmenge auf als Tiere mit dem Genotyp BB, heterozygote Tiere lagen dazwischen. Der Proteingehalt war bei Kühen mit dem Genotyp AA signifikant höher als bei Tieren mit dem Genotyp BB (Ng-Kwai-Hang et al., 1984). Der Fettgehalt war dafür bei Kühen des Genotyps BB signifikant höher als bei Kühen des Genotyps AA (Ng-Kwai-Hang et al., 1984; Aleandri et al., 1990; Tsiaras et al., 2005). Andere wiederum fanden keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten und den Leistungsmerkmalen (Kim et al., 1998; Kučerová et al., 2006; Heck et al., 2009).

In einer älteren Arbeit beschäftigten sich Wissenschaftler mit dem Käseertrag (Aleandri et al., 1990). Durch den höheren Fettgehalt, welcher bei Aleandri et al. (1990) bei Kühen mit dem Genotyp BB festgestellt wurde, führte der Genotyp BB zu höherer Käseausbeute. Der Caseingehalt und die Caseinzahl waren bei der β -Lactoglobulin-Variante B signifikant höher (Schaar et al., 1985). Die Caseinzahl entspricht dem „relativen Anteil des Caseins am Gesamteiweißgehalt“ (Buchberger et al., 2004). Bei der Variante B ist ein höherer Caseingehalt von 3 % (absolut) im Vergleich zur Variante A feststellbar (Buchberger et al., 1996). Heck et al. (2009) stellten fest, dass das B-Allel die relative Konzentration vom β -Lactoglobulin senkt und die relative Konzentration von den vier Caseinen (α_{s1} -, α_{s2} -, β - und κ -Casein) und vom α -

Lactalbumin erhöht. Zwischen der β -Lactoglobulin-Variante B und dem Käseertrag konnte ein positiver Zusammenhang festgestellt werden (Wedholm et al., 2006). Die Varianten B und C zeigten eine höhere Hitzestabilität im Vergleich zur Variante A (Keppler et al., 2014).

3 Tiere, Material und Methoden

3.1 Ausgangsdaten

Für die Erhebung der Milcheiweißvarianten wurden Stiermütter und Teststiere sowie geprüfte Stiere ausgewählt. Von insgesamt 210 Stiermüttern (Stand: April 2017), wovon 158 reinrassig waren und 52 einen Red Holstein-Fremdgenanteil von über 6,25 % hatten, wurden 132 Stiermütter zur Untersuchung der Milcheiweißvarianten ausgewählt. Die Proben wurden zwischen Juli und September 2017 gesammelt. Außerdem wurden 179 Stiere zur Untersuchung bestimmt, wobei 43 Stiere aus Südtirol stammten. Zusätzlich wurden von den Landwirten 129 Kühe und 1 Natursprungstier untersucht. Dadurch konnten insgesamt 441 Ergebnisse für das β -Casein gewonnen werden. Für das κ -Casein standen 364 Ergebnisse zur Verfügung, wovon 231 Proben über die Milch untersucht wurden und die restlichen Proben über Sperma oder Gewebe. Für das α_{s1} -Casein und das β -Lactoglobulin gab es 231 Ergebnisse, da das α_{s1} -Casein und das β -Lactoglobulin nur über die Milchprobe bestimmt wurden. Die Milcheiweißvarianten der Stiere wurden über eine Sperma- bzw. Gewebeprobe ermittelt, die weiblichen Tiere wurden entweder über eine Milch- oder Gewebeprobe untersucht. Außerdem wurden noch 593 Daten aus älteren Untersuchungen (Untersuchungen über Milch) zur Verfügung gestellt, wodurch der Gesamtdatensatz 1.034 Tiere umfasste. Die Ergebnisse der älteren Untersuchungen stammen von Erhardt (1996), Mayer et al. (1997), Mayer und Tschertou (2003) und Caroli et al. (2010). Die Anzahl an untersuchten Tieren ist in Tabelle 5 ersichtlich. Für Berechnungen, bei denen Pedigrees und Leistungen benötigt wurden, mussten einige Tiere aufgrund fehlender Abstammung ausgeschlossen werden.

Tabelle 5: Probenübersicht für α_{s1} -, β -, κ -Casein und β -Lactoglobulin

Gen	aktuelle Untersuchung	ältere Untersuchungen ¹	Gesamtanzahl
α_{s1} -Casein	231 Kühe	574 Kühe	805
β -Casein	441 (261 Kühe, 180 Stiere)	563 Kühe	1.004
κ -Casein	364 (239 Kühe, 125 Stiere)	584 Kühe	948
β -Lactoglobulin	231 Kühe	378 Kühe	609

¹ Daten aus den Studien von Erhardt (1996), Mayer et al. (1997), Mayer und Tschertou (2003), Caroli et al. (2010)

3.2 Statistische Auswertung

Statistische Auswertungen wurden mit dem Statistikprogramm SAS 9.4 (2013, Version 9.4, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) durchgeführt. Zur Interpretation aller Ergebnisse wird bei einem p-Wert $< 0,05$ ($< 5\%$) die Nullhypothese verworfen. Ein p-Wert $< 0,05$ bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit dafür, ein solches Stichprobenergebnis (oder ein extremeres) zufällig zu erhalten, wenn die Nullhypothese zutrifft, unter 5% liegt.

Außerdem wurden das Programm HAPLORE (Zhang et al., 2003), Statistikprogramme von R sowie das Programm PHASE, Version 2.1.1 (Stephens et al., 2001; Stephens und Scheet, 2005) verwendet.

3.2.1 Berechnung der Allel-, Genotyp- und Haplotypfrequenzen

Mit der Prozedur proc freq (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) wurden für den vorliegenden Datensatz Allel- und Genotypfrequenzen sowie kombinierte Genotypfrequenzen berechnet. Das Programm HAPLORE (Zhang et al., 2003) wurde für die Berechnung von Haplotypfrequenzen herangezogen. Das Programm HAPLORE schätzt Haplotypfrequenzen und kann Haplotypen rekonstruieren (Zhang et al., 2005). Ein Problem können große Pedigrees sein. Die eingespielten Datensätze waren bereits zu umfangreich und führten leider zu keinem Ergebnis.

3.2.2 Schätzung von Allelfrequenzen

In Zusammenarbeit mit Hermann Schwarzenbacher (ZuchtData) wurden für die Pinzgauerpopulation Allelfrequenzen geschätzt. Die Schätzung der Frequenzen erfolgte mit dem Ansatz nach Gengler et al. (2007). Mit Hilfe dieses Ansatzes können anhand einer linearen Regression Frequenzen für große Pedigrees mit einem hohen Anteil an nicht genotypisierten Tieren berechnet werden.

Für die Berechnung wurde ein Datensatz mit allen genotypisierten Pinzgauer-Tieren und noch jeweils 500 zufällig ausgewählten weiblichen Pinzgauern aus den Jahrgängen 1995, 2000, 2005, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 und 2017 erstellt.

Für diese 6.501 Tiere wurde dann eine Verwandtschaftsmatrix aufgebaut. Es erfolgte eine Zuchtwertschätzung mit dem Merkmal Genotypenstatus („0-1-2“ Kodierung) innerhalb des

Genortes, wobei für diesen Phänotyp eine Sicherheit von 100 % angegeben wurde. Für die weiblichen Tiere, welche nicht typisiert sind, wurde über die Verwandtschaftsinformationen der wahrscheinlichste Genotyp vorhergesagt. Bei Genorten mit mehr als zwei Allelen wurde für jedes Allel eine Zuchtwertschätzung durchgeführt, wobei als Merkmal der Genotypenstatus nach der „0-1-2“ Kodierung für das jeweilige Allel definiert wurde. Die Ergebnisse wurden dann innerhalb der Jahrgänge aufsummiert. Die Berechnung erfolgte mit Statistikprogrammen von R.

3.2.3 Schätzung von Haplotypfrequenzen

In Zusammenarbeit mit Hermann Schwarzenbacher (ZuchtData) wurden Haplotypfrequenzen berechnet. Für die Schätzung der Haplotypfrequenzen wurde das Programm PHASE, Version 2.1.1 (Stephens et al., 2001; Stephens und Scheet, 2005) verwendet. Haplotypen werden mit erhöhter Sicherheit für die Proben konstruiert und Haplotypfrequenzen geschätzt. Die Methode ist für Genorte, die eng gekoppelt sind, gut geeignet, verwendet allerdings keine Pedigreeinformation (Stephens et al., 2001). Verwendet wurde der Datensatz mit den aktuellen und älteren Ergebnissen.

3.2.4 Berechnung von Unterschieden hinsichtlich Fremdgenanteile

Mit dem Fisher Exact Test (Option: Exact fisher) des Statistikprogramm Pakets von SAS 9.4 wurde getestet, ob es einen signifikanten Unterschied zwischen dem Auftreten von Genotypen bei reinrassigen Pinzgauern (bis RF-Anteil von 6,25 %) und Pinzgauern mit Red Holstein-Anteil (RF-Anteil > 6,25 %) gibt. Für die Berechnung beim β -Casein, bei dem aktuelle sowie ältere Resultate inkludiert sind (n = 970), wurde die Monte-Carlo-Simulation für den exakten Test verwendet (Option: Exact fisher / MC n = 100.000), da der Fisher Exact Test kein Resultat brachte.

3.2.5 Effekt von (kombinierten) Genotypen auf Milchleistungsmerkmale

Mit einem einfachen Modell wurden mit der SAS Prozedur glm Effekte von Genotypen sowie kombinierten Genotypen auf Milchleistungsmerkmale getestet.

Für die Milchleistungsmerkmale Milchmenge, Fettmenge, Eiweißmenge, Fettgehalt und Eiweißgehalt wurden dazu deregressierte Zuchtwerte verwendet. Die deregressierten Zuchtwerte wurden von Christian Fürst (ZuchtData) berechnet, wobei die Deregression mit der Software MiX99 (MiX99 Development Team, 2015) durchgeführt wurde. Bei deregressierten Zuchtwerten werden die durchschnittlichen Informationen der Eltern entfernt. Außerdem sind für die Berechnung der deregressierten Zuchtwerte die Sicherheiten der geschätzten Zuchtwerte notwendig (Garrick et al., 2009).

Mit folgendem linearen Modell wurden Milchleistungsmerkmale analysiert:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk}$$

- Y_{ijk} = deregressierter Zuchtwert für Milchmenge, Fettmenge, Fettgehalt, Eiweißmenge oder Eiweißgehalt
- μ = gemeinsame Konstante (Intercept)
- α_i = Fixer Effekt des Genotyps (α_{s1} -, β - oder κ -Casein, β -Lactoglobulin) bzw. α_{s1} - β - κ -Casein-Genotyp oder β - κ -Casein-Genotyp
- β_j = Fixer Effekt des Geburtsjahres
- ε_{ijk} = Residue (Restkomponente)

Das Geburtsjahr ist wegen der Berücksichtigung des Zuchtfortschrittes inkludiert.

3.2.5.1 α_{s1} -Casein-Genotypen

In das Modell wurden alle drei vorkommenden Genotypen (BB, BC und CC) genommen. Insgesamt konnten 738 Tiere für die Schätzung der Effekte der α_{s1} -Casein-Genotypen auf Milchleistungsmerkmale herangezogen werden.

3.2.5.2 β -Casein-Genotypen

Für das Modell wurden nur die drei am häufigsten vorkommenden Genotypen (A1A1, A1A2, A2A2) verwendet. Die weiteren fünf Genotypen (A1B, A1C, A2B, A2C und BC) wurden aufgrund geringer Häufigkeit aus dem Modell herausgenommen, da es zu einem verzerrten Ergebnis geführt hätte. Es wurde zuvor getestet, ob es Unterschiede im Ergebnis gibt, wenn die Varianten B und C, die zu A1-ähnlichen Varianten zählen, als A1 gerechnet werden. Da es

keine wesentlichen Unterschiede im Vergleich zum verwendeten Modell brachte, wurden sie im Modell nicht als A1-ähnlich gewertet. Daher wurden 84 Tiere von den Berechnungen ausgeschlossen bzw. 888 Tiere in die Berechnung einbezogen.

3.2.5.3 κ -Casein-Genotypen

Insgesamt stand ein Datensatz von 864 Ergebnissen mit sieben verschiedenen κ -Casein-Genotypen zur Verfügung. Da die vier Genotypen AE, AG, BE und BG nur in sehr geringer Häufigkeit auftraten, mussten sie aus dem Modell eliminiert werden. Die Berechnung erfolgte mit den drei häufigsten Genotypen AA, AB und BB (839 Datensätze).

3.2.5.4 β -Lactoglobulin-Genotypen

Für die Berechnung wurden nur die zwei β -Lactoglobulin-Genotypen AB und BB verwendet, der Genotyp AA musste aufgrund des geringen Auftretens ($n = 10$) aus der Berechnung ausgeschlossen werden. Für die Berechnung standen somit 582 Datensätze zur Verfügung.

3.2.5.5 β - κ -Casein-Genotypen

Es traten 28 verschiedene Genotypen bei 842 Tieren auf. In die Berechnung einbezogen wurden nur die sechs häufigsten kombinierten β - κ -Casein-Genotypen (A1A1-AA, A1A1-AB, A1A2-AA, A1A2-AB, A2A2-AA, A2A2-AB), wodurch 707 Datensätze in die Berechnung genommen wurden.

3.2.5.6 α_{s1} - β - κ -Casein-Genotypen

Bei 723 Ergebnissen ergaben sich 45 verschiedene α_{s1} - β - κ -Casein-Genotypen. In das Modell wurden nur die fünf häufigsten kombinierten α_{s1} - β - κ -Casein-Genotypen (BB-A1A1-AA, BB-A1A2-AA, BB-A1A2-AB, BC-A1A2-AA, BC-A2A2-AA) mit 363 Datensätzen einbezogen.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Allel- und Genotypfrequenzen

4.1.1 α_{s1} -Casein

Allel- und Genotypfrequenzen der untersuchten Kühe

Variante B kam mit einer Häufigkeit von 79 % weitaus öfter vor als Variante C mit 21 %. Der Genotyp BB trat bei den untersuchten Tieren mit einer Häufigkeit von 62,77 % am öftesten auf, gefolgt vom Genotyp BC mit 32,47 %. Mit einer Frequenz von 4,76 % kam der Genotyp CC vergleichsweise selten vor. In Tabelle 6 sind die Allel- und Genotypfrequenzen dargestellt.

Tabelle 6: Darstellung der α_{s1} -Casein-Varianten und Allelfrequenzen sowie α_{s1} -Casein-Genotypen und Genotypfrequenzen der untersuchten Tiere (n = 231)

Variante	Allelfrequenz in %	Genotyp	Anzahl der Tiere	Genotypfrequenz in %
B	79	BB	145	62,77
C	21	BC	75	32,47
		CC	11	4,76

Bei bisherigen Untersuchungen traten ebenfalls die α_{s1} -Casein-Varianten B und C bei der Rasse Pinzgauer auf. Vergleiche mit diesen Studien zeigen, dass die Variante B in den letzten Jahren leicht zunahm und die Variante C leicht in der Frequenz sank. Die Variante B wies bei den bisherigen Untersuchungen (Buchberger et al., 1996; Erhardt, 1996; Mayer et al., 1997; Caroli et al., 2010) eine Frequenz in der Höhe von 72,1 % bis 75,2 % auf, während sie bei der aktuellen Untersuchung auf 79 % kam. Variante C hatte in älteren Studien eine Frequenz von 24,8 % bis 27,9 %, während sie bei dieser Erhebung eine Häufigkeit von 21 % aufwies. Verglichen mit den Rassen Fleckvieh, Braunvieh und Holstein tritt die Variante C bei der Rasse Pinzgauer häufiger auf. Beim Fleckvieh war die Variante C bei bisherigen Untersuchungen in einer Höhe von 10,7 % bis 12,2 % und daher in niedrigerer Frequenz als bei den Pinzgauern vorzufinden (Kučerová et al., 2006; Mayer et al., 1997). Bei der Rasse Holstein kam mit einer Frequenz von über 99 % in aktuelleren Studien fast ausschließlich die Variante B vor (Heck et al., 2009; Gustavsson et al., 2014) und auch das Braunvieh weist eine niedrigere Frequenz für Variante C auf (2,7 % bei Kim et al. (1998) und 6,7 % bei Mayer et al. (1997)). Ein sehr ähnliches Ergebnis wie das Pinzgauer-Rind zeigte das Tiroler Grauvieh mit einer Frequenz von 20,8 % für Variante C

(Mayer et al., 1997). Jerseys hatten mit einer Allelfrequenz von 42,8 % das höchste Auftreten der Variante C (Gustavsson et al., 2014).

Schätzung der Allelfrequenzen nach dem Ansatz von Gengler et al. (2007)

Bei der Schätzung der Frequenzen nach dem Ansatz von Gengler et al. (2007) für eine Pinzgauerpopulation von 6.501 Tieren sind die Ergebnisse in einem ähnlichen Bereich wie in den bisherigen Studien und der aktuellen Untersuchung. Vergleicht man in der Tabelle 7 den Geburtsjahrgang 1995 mit dem Geburtsjahrgang 2017, lässt sich feststellen, dass die Verteilung der Varianten B und C in der Pinzgauerpopulation fast gleich blieb, da für 1995 der Frequenzschätzwert für Variante B 76,7 % und für 2017 77,7 % betrug, für Variante C lag der Schätzwert 1995 bei 23,3 % und 2017 bei 22,3 %.

Der Ansatz von Gengler et al. (2007) scheint gut geeignet zu sein, um die Populationsfrequenzen des α_{s1} -Caseins zu schätzen.

Tabelle 7: Frequenzschätzwerte der α_{s1} -Casein-Varianten in der Pinzgauerpopulation nach dem Ansatz von Gengler et al. (2007)

Geburtsjahrgang	Variante B	Variante C
1995	0,767	0,233
2000	0,752	0,248
2005	0,752	0,248
2010	0,756	0,244
2011	0,760	0,240
2012	0,756	0,244
2013	0,775	0,225
2014	0,782	0,218
2015	0,776	0,224
2016	0,771	0,229
2017	0,777	0,223

Unterschiede Pinzgauer und Pinzgauer x RF

Bei einer Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauer-Rindern und Pinzgauer-Rindern mit Red Holstein-Anteil zeigte sich, dass der Anteil von Tieren, die den Genotyp BB trugen, bei den

Pinzgauern mit RF-Anteil höher war, während Tiere mit dem Genotyp CC nur bei reinrassigen Pinzgauern vorkamen. Die Frequenzen für die Tiere der vorliegenden Untersuchung sind in den Tabellen 8 und 9 ersichtlich.

Tabelle 8: Darstellung der α_{s1} -Casein-Allelfrequenzen bei Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern (n = 193) und Pinzgauern mit RF-Anteil > 6,25 % (n = 35)

Variante	Allelfrequenz in % bei reinrassigen Pinzgauern	Allelfrequenz in % bei PI x RF-Tieren
B	77,72	85,71
C	22,28	14,29

Tabelle 9: Darstellung der α_{s1} -Casein-Genotypen und Genotypfrequenzen bei Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern (n = 193) und Pinzgauern mit RF-Anteil > 6,25 % (n = 35)

Genotyp	Anzahl reinrassige PI	Genotypfrequenz in % bei reinrassigen PI	Anzahl PI x RF	Genotypfrequenz in % bei PI x RF
BB	118	61,14	25	71,43
BC	64	33,16	10	28,57
CC	11	5,70	0	0

Die Häufigkeiten der verschiedenen α_{s1} -Casein-Genotypen bei reinrassigen Pinzgauern und Pinzgauern mit RF-Anteil unterschieden sich nicht signifikant ($p = 0,3076$). Die Anzahl an gekreuzten Pinzgauern war mit 35 Tieren allerdings relativ gering.

Wurden alle vorhandenen Daten in die Testung miteinbezogen ($n = 783$, Berücksichtigung der älteren Studien), dann gab es einen statistisch signifikanten Unterschied ($p = 0,0118$). In Tabelle 10 sind die Genotypfrequenzen von reinrassigen Pinzgauern und Pinzgauern mit RF-Anteil dargestellt. Da die Variante C bei der Rasse Holstein sowohl in älteren als auch neueren Studien nur in sehr geringer Frequenz von 0,3 % bis 3,2 % vorkam und fast ausschließlich die Variante B vorzufinden war (Ng-Kwai-Hang et al., 1984; Mayer et al., 1997; Heck et al., 2009; Gustavsson et al., 2014), kann davon ausgegangen werden, dass bei einer Einkreuzung mit Red Holstein fast ausschließlich die Variante B von den Holstein-Stieren kommt und dadurch ein signifikanter Unterschied auftrat.

Tabelle 10: Darstellung der α_{s1} -Casein-Genotypen und Genotypfrequenzen unter Berücksichtigung älterer Studien¹ bei Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern (n = 585) und Pinzgauern mit RF-Anteil > 6,25 % (n = 198)

Genotyp	Anzahl reinrassige PI	Genotypfrequenz in % bei reinrassigen PI	Anzahl PI x RF	Genotypfrequenz in % bei PI x RF
BB	310	52,99	121	61,11
BC	225	38,46	71	35,86
CC	50	8,55	6	3,03

¹ Daten von Erhardt (1996), Mayer et al. (1997), Mayer und Tschertou (2003), Caroli et al. (2010) inkludiert

4.1.2 β -Casein

Allel- und Genotypfrequenzen der untersuchten Tiere

Die Variante A2 wurde mit einer Frequenz von 53,51 % am häufigsten festgestellt, gefolgt von Variante A1 mit 44,67 %. Die Varianten B und C traten mit 0,11 % bzw. 1,70 % vergleichsweise selten auf.

Der heterozygote Genotyp A1A2 kam mit einer Frequenz von 46,03 % am häufigsten vor. Der homozygote Genotyp A2A2 trat mit einer Häufigkeit von 29,48 % öfter auf als der homozygote Genotyp A1A1 (20,86 %). Drei weitere Genotypen (A1C, A2B und A2C) wurden wesentlich seltener festgestellt. Die Frequenzen der in dieser Arbeit untersuchten Tiere sind in Tabelle 11 ersichtlich.

Tabelle 11: Darstellung der β -Casein-Varianten und Allelfrequenzen sowie β -Casein-Genotypen und Genotypfrequenzen der untersuchten Tiere (n = 441)

Variante	Allelfrequenz in %	Genotyp	Anzahl der Tiere	Genotypfrequenz in %
A1	44,67	A1A1	92	20,86
A2	53,51	A1A2	203	46,03
B	0,11	A2A2	130	29,48
C	1,70	A1C	7	1,59
		A2B	1	0,23
		A2C	8	1,81

Vergleiche mit bisher untersuchten Pinzgauern aus Österreich und Bayern zeigen, dass in diesen Studien ebenfalls die vier β -Casein-Varianten A1, A2, B und C festgestellt wurden und bei allen die Variante A2 am häufigsten auftrat. Die Variante A2 lag mit 53,51 % zwar

geringfügig niedriger, aber in einem sehr ähnlichen Bereich wie in bisherigen Studien, in denen das A2-Allel eine Frequenz von 55,3 % bis 59 % aufwies. Die Variante A1 kam dafür mit einer Häufigkeit von 44,67 % öfter vor als in den bisherigen Studien, die eine Frequenz von 31,7 % bis 36,5 % für das A1-Allel publizierten. Die Varianten B und C kamen bei der aktuellen Untersuchung mit 0,11 % bzw. 1,7 % noch seltener vor als in den bisherigen Studien, in denen Variante B in der Höhe von 1,5 % bis 4 % und Variante C in der Höhe von 4,2 % bis 5,6 % auftraten (Buchberger et al., 1996; Erhardt, 1996; Mayer et al., 1997; Caroli et al., 2010). Bei slowakischen Pinzgauern war es genau umgekehrt: Variante A1 trat häufiger auf als Variante A2, wobei nur eine kleine Stichprobe mit 89 Tieren vorlag (Miluchová et al., 2014) und das Ergebnis somit nur bedingt aussagekräftig ist.

Die in Österreich am häufigsten vorkommenden Rassen zeigen für die Variante A2 die größte Häufigkeit, so weist das Fleckvieh für das A2-Allel eine vergleichsweise hohe Frequenz von 59,6 % bis 80,9 % auf (Mayer et al., 1997; Kučerová et al., 2006; Bonfatti et al., 2010). Bei der Rasse Holstein dürfte sich das Verhältnis ebenfalls zugunsten der Variante A2 verändert haben, denn zeigen ältere Studien die höchste Frequenz für die Variante A1 (Ng-Kwai-Hang et al., 1984; Aleandri et al., 1990), so stellen neuere Studien die höchste Frequenz für die Variante A2 dar (Heck et al., 2009; Olenski et al., 2010; Visker et al., 2010; Gustavsson et al., 2014). Bei der Rasse Braunvieh tritt die Variante A2 ebenfalls mit einer hohen Frequenz bis circa 80 % auf (Potočnik et al., 2016). Die Rasse Jersey hatte in verschiedenen Veröffentlichungen eine Frequenz für A2 von 58 % bis 71,2 % (Bech und Kristiansen, 1990; Mayer et al., 1997; Gustavsson et al., 2014) und das Tiroler Grauvieh wies für das A2-Allel eine Frequenz von 61,2 % auf (Mayer et al., 1997).

Wird das aktuelle Ergebnis der Variante A2 von Pinzgauern mit anderen Rassen verglichen, zeigt sich, dass die meisten Rassen eine etwas höhere Frequenz für die Variante A2 aufweisen als das Pinzgauer-Rind. Eine niedrigere Frequenz für das A2-Allel hatten zum Beispiel die Schwedischen Rotbunten mit 50,9 % (Gustavsson et al., 2014). Am häufigsten trat die Variante A2 bei der Rasse Guernsey mit 96 % auf, wobei die Variante A1 gar nicht festgestellt wurde (Van Eenennaam und Medrano, 1991).

Die Häufigkeit der Variante A1 war dafür beim Pinzgauer-Rind höher als bei vielen anderen Rassen. Niedrige Allelfrequenzen für Variante A1 wiesen das Grauvieh mit einer Häufigkeit von 12,4 % und die Rasse Jersey mit einer Frequenz von 4,2 % bis 8,1 % auf (Bech und Kristiansen, 1990; Mayer et al. 1997; Gustavsson et al., 2014).

Die Variante B kam beim Braunvieh mit einer Frequenz von 16,1 % bis 16,4 % (Mayer et al., 1997; Kim et al., 1998), bei Jersey mit einer Häufigkeit von 21,8 % bis 35 % (Bech und Kristiansen, 1990; Mayer et al., 1997; Gustavsson et al., 2014) und beim Tiroler Grauvieh (Mayer et al., 1997) mit einer Frequenz von 21,8 % im Vergleich zum Auftreten beim Pinzgauer-Rind oft vor. Die Variante C, die beim Pinzgauer-Rind in niedriger Frequenz vorkommt, kam bei anderen Rassen gar nicht oder in ebenfalls relativ niedriger Frequenz vor.

Schätzung der Allelfrequenzen nach dem Ansatz von Gengler et al. (2007)

Bei der Schätzung nach dem Ansatz von Gengler et al. (2007) zeigt sich, dass sich die Frequenzen in der Pinzgauerpopulation seit 1995 nur gering verändert haben. In Tabelle 12 sind die Allelfrequenzen ersichtlich. Variante A2 ist bei allen Schätzwerten die häufigste Variante. Die Varianten B und C, die ohnehin in sehr geringem Ausmaß auftreten, kommen in den aktuellen Jahren in noch geringeren Frequenzen vor. Die Ergebnisse nach diesem Ansatz sind sehr realistisch und weisen darauf hin, dass der Ansatz nach Gengler et al. (2007) plausible Ergebnisse trotz einer höheren Anzahl an nicht genotypisierten Tieren in den betreffenden Jahrgängen liefert.

Tabelle 12: Frequenzschätzwerte der β -Casein-Varianten in der Pinzgauerpopulation nach dem Ansatz von Gengler et al. (2007)

Geburtsjahrgang	A1	A2	B	C
1995	0,400	0,531	0,026	0,043
2000	0,374	0,559	0,025	0,043
2005	0,384	0,553	0,019	0,043
2010	0,403	0,544	0,015	0,037
2011	0,411	0,537	0,015	0,036
2012	0,391	0,560	0,015	0,033
2013	0,418	0,534	0,015	0,033
2014	0,434	0,523	0,014	0,029
2015	0,441	0,515	0,015	0,028
2016	0,425	0,532	0,014	0,028
2017	0,413	0,541	0,016	0,030

Unterschiede Pinzgauer und Pinzgauer x RF

Bei einer Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauer-Rindern und Pinzgauern mit Red Holstein-Anteil zeigte sich, dass bei der aktuellen Untersuchung der Genotyp A2A2 bei Pinzgauer x RF-Tieren etwas häufiger auftrat als bei reinrassigen Pinzgauern. Es gab aber keinen signifikanten Unterschied ($p = 0,2984$) in der Häufigkeit des Auftretens der Genotypen bei reinrassigen Pinzgauern und Pinzgauer mit RF-Anteil und das Ergebnis kann somit als Zufall erklärt werden. Ebenfalls keinen signifikanten Zusammenhang gab es, wenn die Ergebnisse der älteren Studien ($n = 970$) miteinbezogen wurden ($p = 0,5841^1$). Dass hier kein merklicher Unterschied auftrat, wird darauf zurückzuführen sein, dass auch bei der Rasse Holstein zum Beispiel die Variante A2 in einem ähnlichen Ausmaß wie beim Pinzgauer-Rind auftritt, denn je nach Studie beläuft sich die Frequenz der Variante A2 auf circa 50 bis 70 % (Heck et al., 2009; Olenski et al., 2010; Visker et al., 2010; Gustavsson et al., 2014). Tabellen 13 bis 15 präsentieren die Frequenzen bei reinrassigen Pinzgauern und Pinzgauer x RF.

¹= Berechnung mit Monte-Carlo-Simulation, da der Fisher Exact Test kein Ergebnis brachte

Tabelle 13: Darstellung der β -Casein-Allelfrequenzen bei Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern ($n = 340$) und Pinzgauern mit RF-Anteil $> 6,25\%$ ($n = 86$)

Variante	Allelfrequenz in % bei reinrassigen PI	Allelfrequenz in % bei PI x RF-Tieren
A1	46,03	38,37
A2	52,35	58,72
C	1,47	2,91
B	0,15	0

Tabelle 14: Darstellung der β -Casein-Genotypen und Genotypfrequenzen bei Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern ($n = 340$) und Pinzgauern mit RF-Anteil $> 6,25\%$ ($n = 86$)

Genotyp	Anzahl reinrassige PI	Genotypfrequenz in % bei reinrassigen PI	Anzahl PI x RF	Genotypfrequenz in % bei PI x RF
A1A1	72	21,18	14	16,28
A1A2	164	48,24	36	41,86
A2A2	93	27,35	31	36,05
A1C	5	1,47	2	2,33
A2C	5	1,47	3	3,49
A2B	1	0,29	0	0

Tabelle 15: Darstellung der β -Casein-Genotypen und Genotypfrequenzen unter Berücksichtigung älterer Studien¹ mit Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern (n = 722) und Pinzgauern mit RF-Anteil > 6,25 % (n = 248)

Genotyp	Anzahl reinrassige PI	Genotypfrequenz in % bei reinrassigen PI	Anzahl PI x RF	Genotypfrequenz in % bei PI x RF
A1A1	119	16,48	42	16,94
A1A2	309	42,80	102	41,13
A2A2	230	31,86	78	31,45
A1B	2	0,28	4	1,61
A1C	18	2,49	7	2,82
A2B	12	1,66	4	1,61
A2C	30	4,16	10	4,03
BC	2	0,28	1	0,40

¹ Daten von Erhardt (1996), Mayer et al. (1997), Mayer und Tschertou (2003), Caroli et al. (2010) inkludiert

4.1.3 κ -Casein

Allel- und Genotypfrequenzen der untersuchten Tiere

Das A-Allel kam mit einer Frequenz von 77,88 % am öftesten vor. Die κ -Casein-Variante B trat mit einer Frequenz von 21,02 % am zweithäufigsten auf. Die Varianten E und G wurden wesentlich seltener festgestellt.

Der Genotyp AA kam mit einer Häufigkeit von 59,89 % am öftesten vor, gefolgt vom heterozygoten Genotyp AB mit einer Frequenz von 34,34 %. Der Genotyp BB kam mit einer Häufigkeit von 3,57 % wesentlich seltener vor. Weitere Genotypen (AE, AG, BE und BG) kamen in geringen Anzahlen vor. Tabelle 16 gibt eine Übersicht über die Frequenzen.

Tabelle 16: Darstellung der κ -Casein-Varianten und Allelfrequenzen sowie κ -Casein-Genotypen und Genotypfrequenzen der untersuchten Tiere (n = 364)

Variante	Allelfrequenz in %	Genotyp	Anzahl der Tiere	Genotypfrequenz in %
A	77,88	AA	218	59,89
B	21,02	AB	125	34,34
E	0,69	BB	13	3,57
G	0,41	AE	4	1,10
		AG	2	0,55

		BE	1	0,27
		BG	1	0,27

Die Variante A lag mit 77,88 % in einem ähnlichen Bereich wie bei bisherigen Untersuchungen, die dort in einer Höhe von 72,8 % bis 78,3 % veröffentlicht wurde (Buchberger et al., 1996; Erhardt, 1996; Mayer et al., 1997; Caroli et al., 2010). Verglichen mit der aktuellsten Studie von Caroli et al. (2010) trat jedoch die Variante A um über 5 % häufiger und die Variante B um über 5 % seltener auf. Variante B trat nämlich bei Caroli et al. (2010) in einer Höhe von 26,6 % auf, während sie in dieser Studie auf 21,02 % kam. Bei den Ergebnissen der Varianten E und G ist zu beachten, dass bei jenen Tieren, die über eine Sperma- oder Gewebeprobe untersucht wurden (n = 133), nur zwischen den Varianten A und B unterschieden wurde. Da die Varianten E und G nur sehr selten erscheinen, wurden alle Ergebnisse aufgrund der besseren Übersicht zusammengefasst. Die Varianten E und G traten mit einer Frequenz von 0,69 % bzw. 0,41 % auf, sie hatten aber auch in bisherigen Arbeiten niedrige Frequenzen (Erhardt, 1996; Mayer et al., 1997; Caroli et al., 2010). Interessant ist, dass die Variante G bei Caroli et al. (2010) trotz einer relativ hohen Stichprobenanzahl nicht auftrat. Die Variante G wurde 1996 bei Pinzgauern von Erhardt (1996) entdeckt.

Vergleiche mit anderen Rassen zeigen, dass das Fleckvieh (28,6 % bis 37,8 %), das Holstein-Rind (23,9 % bis 30,9 %), das Braunvieh (29,3 % bis 59,2 %), das Grauvieh (45,2 %) und die Jerseys (65,8 % bis 79,4 %) eine höhere Frequenz für Variante B aufweisen als das Pinzgauer-Rind (Bech und Kristiansen, 1990; Mayer et al., 1997; Kim et al., 1998; Kučerová et al., 2006; Heck et al., 2009; Bonfatti et al., 2010; Gustavsson et al., 2014). In älteren Studien zeigte die Rasse Holstein eine höhere Frequenz für Variante A von 74,4 % bis 84,3 % (Ng-Kwai-Hang et al., 1984; Mayer et al., 1997). Bei der Rasse Holstein lag die Frequenz für Variante E bei 6,4 % bis 9,2 % und damit in einem höheren Bereich als bei der Rasse Pinzgauer (Gustavsson et al., 2014; Heck et al., 2009). Die Variante E beim Pinzgauer-Rind ist auf die Einkreuzung mit Red Holstein zurückzuführen (Erhardt, 1996). Variante E wurde auch bei der Rasse Fleckvieh (Kučerová et al., 2006), bei der ebenfalls Red Holstein eingekreuzt wurde (Willam, 2011), festgestellt. In der Fleckviehpopulation wird daher diese Variante ebenso auf die Einkreuzung mit Red Holstein zurückzuführen sein.

Schätzung der Allelfrequenzen nach dem Ansatz von Gengler et al. (2007)

Die Schätzwerte, die mit dem Ansatz nach Gengler et al. (2007) berechnet wurden, ergaben, dass die Variante A seit 1995 in der Pinzgauerpopulation höher geworden ist. So beträgt der Frequenzschätzwert für 1995 72,3 % und für das Geburtsjahr 2017 78,2 %. Dafür tritt die Variante B mit 25,3 % im Geburtsjahr 1995 nun mit 20,3 % im Geburtsjahr 2017 seltener auf (Tabelle 17). Das Bild, dass die Allelfrequenz der Variante A etwas höher wurde und die Allelfrequenz der Variante B etwas zurückging, zeichnete sich auch schon beim Vergleich zwischen der Studie von Caroli et al. (2010) und der aktuellen Untersuchung ab.

Tabelle 17: Frequenzschätzwerte der κ -Casein-Varianten in der Pinzgauerpopulation nach dem Ansatz von Gengler et al. (2007)

Geburtsjahrgang	A	B	E	G
1995	0,723	0,253	0,014	0,010
2000	0,730	0,249	0,014	0,007
2005	0,723	0,258	0,013	0,006
2010	0,759	0,225	0,010	0,005
2011	0,755	0,230	0,010	0,004
2012	0,757	0,228	0,010	0,005
2013	0,770	0,216	0,010	0,004
2014	0,782	0,205	0,009	0,003
2015	0,772	0,215	0,009	0,003
2016	0,769	0,218	0,010	0,004
2017	0,782	0,203	0,010	0,004

Unterschiede Pinzgauer und Pinzgauer x RF

Beim κ -Casein gab es einen statistisch signifikanten Unterschied ($p = 0,0039$) hinsichtlich der Häufigkeit des Auftretens von Genotypen zwischen reinrassigen Pinzgauern und Pinzgauern mit Red Holstein-Anteil. Genotypen mit der Variante G kamen bei der aktuellen Untersuchung nur bei reinrassigen Pinzgauer-Tieren, Genotypen mit der Variante E nur bei gekreuzten Pinzgauern vor. Die Variante G wurde bei der Rasse Pinzgauer entdeckt und die Variante E wurde bei Pinzgauern auf die Einkreuzung mit Red Holstein zurückgeführt (Erhardt, 1996).

Wurden die älteren Daten ebenso in die Berechnung miteinbezogen (n = 923), war der Unterschied aber nicht signifikant (p = 0,1195). Im Gesamtdatensatz war die Variante G auch bei Pinzgauer x RF und die Variante E bei reinrassigen Pinzgauern zu finden. Die Tabellen 18 bis 20 präsentieren die Frequenzen bei Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern und Pinzgauern mit RF-Anteil.

Tabelle 18: Darstellung der κ -Casein-Allelfrequenzen bei Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern (n = 309) und Pinzgauern mit RF-Anteil > 6,25 % (n = 52)

Variante	Allelfrequenz in % bei reinrassigen PI	Allelfrequenz in % bei PI x RF-Tieren
A	77,83	78,85
B	21,68	17,31
E	0	3,85
G	0,49	0

Tabelle 19: Darstellung der κ -Casein-Genotypen und Genotypfrequenzen bei Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern (n = 309) und Pinzgauern mit RF-Anteil > 6,25 % (n = 52)

Genotyp	Anzahl reinrassige PI	Genotypfrequenz in % bei reinrassigen PI	Anzahl PI x RF	Genotypfrequenz in % bei PI x RF
AA	186	60,19	31	59,62
AB	107	34,63	17	32,69
AG	2	0,65	0	0
BB	13	4,21	0	0
BG	1	0,32	0	0
AE	0	0	3	5,77
BE	0	0	1	1,92

Tabelle 20: Darstellung der κ -Casein-Genotypen und Genotypfrequenzen unter Berücksichtigung älterer Studien¹ mit Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern (n = 707) und Pinzgauern mit RF-Anteil > 6,25 % (n = 216)

Genotyp	Anzahl reinrassige PI	Genotypfrequenz in % bei reinrassigen PI	Anzahl PI x RF	Genotypfrequenz in % bei PI x RF
AA	385	54,46	116	53,70
AB	265	37,48	81	37,50
AE	6	0,85	6	2,78
AG	8	1,13	1	0,46

BB	39	5,52	8	3,70
BE	2	0,28	2	0,93
BG	2	0,28	2	0,93

¹ Daten von Erhardt (1996), Mayer et al. (1997), Mayer und Tschertou (2003), Caroli et al. (2010) inkludiert

4.1.4 β -Lactoglobulin

Allel- und Genotypfrequenzen der untersuchten Kühe

Die Variante B wurde mit einer Frequenz von 92,21 % nachgewiesen, während die Variante A nur auf 7,79 % kam. Der Genotyp BB wurde mit 84,85 % am weitesten häufigsten festgestellt, gefolgt vom Genotyp AB mit 14,72 %. Nur ein Tier (0,43 %) trug den Genotyp AA. Nachfolgende Tabelle 21 stellt die Allel- und Genotypfrequenzen dar.

Tabelle 21: Darstellung der β -Lactoglobulin-Varianten und Allelfrequenzen sowie β -Lactoglobulin-Genotypen und Genotypfrequenzen der untersuchten Tiere (n = 231)

Variante	Allelfrequenz in %	Genotyp	Anzahl der Tiere	Genotypfrequenz in %
A	7,79	AA	1	0,43
B	92,21	AB	34	14,72
		BB	196	84,85

Die in dieser Untersuchung festgestellten Varianten A und B kamen auch bei bisherigen Untersuchungen vor (Buchberger et al., 1996; Erhardt, 1996; Caroli et al., 2010). Mit einer Allelfrequenz von 92,21 % für die Variante B trat sie häufiger auf als in älteren Studien, in denen die Variante B mit einer Häufigkeit von 82 % bis 86 % vorkam (Buchberger et al., 1996; Erhardt, 1996; Caroli et al., 2010).

Andere Rassen zeigen für die Variante B zum Teil deutlich niedrigere Frequenzen, so weist das Fleckvieh in diversen Studien eine Frequenz von 44,9 % bis 52,7 % für die β -Lactoglobulin-Variante B auf (Mayer et al., 1997; Kučerová et al., 2006; Bonfatti et al., 2010). Bei der Rasse Holstein zeigt eine aktuellere Studie eine Frequenz für die B-Variante von 41,7 % (Heck et al., 2009) und auch das Braunvieh hat im Vergleich zum Pinzgauer-Rind eine niedrigere Frequenz für die Variante B von 58,1 % bis 58,3 % (Mayer et al., 1997; Kim et al., 1998).

Schätzung der Allelfrequenzen nach dem Ansatz von Gengler et al. (2007)

Die Frequenzschätzwerte, die in Tabelle 22 dargestellt sind, zeigen ebenso, dass die Variante B mit über 80 % sehr häufig vorkommt und zwischen 1995 und 2017 um circa 4 % gestiegen ist. Der beobachtete Wert der aktuellen Untersuchung für die Variante B ist mit 92,21 % etwas höher als der Schätzwert der letzten Jahre, der bei 86 % liegt. Variante A tritt dafür bei den Schätzwerten mit über 13 % häufiger auf als bei der aktuellen Untersuchung (7,79 %).

Tabelle 22: Frequenzschätzwerte der β -Lactoglobulin-Varianten in der Pinzgauerpopulation nach dem Ansatz von Gengler et al. (2007)

Geburtsjahrgang	Variante A	Variante B
1995	0,177	0,823
2000	0,170	0,830
2005	0,150	0,850
2010	0,140	0,860
2011	0,137	0,863
2012	0,139	0,861
2013	0,137	0,863
2014	0,135	0,865
2015	0,141	0,859
2016	0,136	0,864
2017	0,138	0,862

Unterschiede Pinzgauer und Pinzgauer x RF

Es gab einen hochsignifikanten Unterschied ($p = 0,0002$) beim Auftreten der Genotypen zwischen reinrassigen Pinzgauern und Pinzgauern mit Red Holstein-Anteil. Wurden auch Daten von den älteren Untersuchungen miteinbezogen ($n = 593$), gab es ebenso einen signifikanten Unterschied ($p = 0,0232$). Die signifikante Differenz ist dadurch begründet, dass die Rasse Holstein eine niedrigere Frequenz für die Variante B aufweist als das Pinzgauer-Rind (Heck et al., 2009). Somit kommt bei einer Einkreuzung mit Red Holstein ein höherer Anteil von Variante A in die Rasse, die bei der Rasse Pinzgauer nur in relativ geringer Frequenz auftritt. Tabellen 23 bis 25 präsentieren die Allel- und Genotypfrequenzen bei der Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern und Pinzgauern mit RF-Anteil.

Tabelle 23: Darstellung der β -Lactoglobulin-Allelfrequenzen bei Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern (n = 193) und Pinzgauern mit RF-Anteil > 6,25 % (n = 35)

Variante	Allelfrequenz in % bei reinrassigen PI	Allelfrequenz in % bei PI x RF-Tieren
A	5,18	18,57
B	94,82	81,43

Tabelle 24: Darstellung der β -Lactoglobulin-Genotypen und Genotypfrequenzen bei Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern (n = 193) und Pinzgauern mit RF-Anteil > 6,25 % (n = 35)

Genotyp	Anzahl reinrassiger PI	Genotypfrequenz in % bei reinrassigen PI	Anzahl PI x RF	Genotypfrequenz in % bei PI x RF
AA	0	0	0	0
AB	20	10,36	13	37,14
BB	173	89,64	22	62,86

Tabelle 25: Darstellung der β -Lactoglobulin-Genotypen und Genotypfrequenzen unter Berücksichtigung älterer Studien¹ mit Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern (n = 458) und Pinzgauern mit RF-Anteil > 6,25 % (n = 135)

Genotyp	Anzahl reinrassiger PI	Genotypfrequenz in % bei reinrassigen PI	Anzahl PI x RF	Genotypfrequenz in % bei PI x RF
AA	8	1,75	2	1,48
AB	77	16,81	37	27,41
BB	373	81,44	96	71,11

¹ Daten von Erhardt (1996), Mayer et al. (1997), Mayer und Tschertou (2003), Caroli et al. (2010) inkludiert

4.1.5 Kombinierte Genotypen

α_{s1} - β -k-Casein-Genotypen

Bei 231 untersuchten Tieren traten 28 verschieden kombinierte Genotypen auf. Der α_{s1} - β -k-Casein-Genotyp BB-A1A2-AA trat mit einer Frequenz von 17,32 % am häufigsten auf (Tabelle 26).

β -k-Casein-Genotypen

Beim β -k-Casein-Genotyp (n = 364) gab es 19 verschieden kombinierte Genotypen, wobei der β -k-Casein-Genotyp A1A2-AA mit einer Häufigkeit von 27,47 % am öftesten vorzufinden war (Tabelle 26).

Tabelle 26: Darstellung der häufigsten α_{s1} - β - κ - und β - κ -Casein-Genotypen

α_{s1} - β - κ -Casein-Genotypen (n = 231)	Häufigkeit in %	β - κ -Casein-Genotypen (n = 364)	Häufigkeit in %
BB-A1A2-AA	17,32	A1A2-AA	27,47
BC-A1A2-AA	10,82	A2A2-AA	19,51
BB-A1A1-AA	9,96	A1A2-AB	15,93
BB-A1A2-AB	9,96	A1A1-AA	12,64
BC-A2A2-AA	9,52	A2A2-AB	7,69
BB-A1A1-AB	7,36	A1A1-AB	7,69
BB-A2A2-AA	7,36	A2C-AB	2,20

Die α_{s1} - β - κ -Casein-Genotypen BB-A1A2-AA und BC-A1A2-AA waren auch in der Studie von Mayer et al. (1997) am häufigsten vorzufinden, wobei beide Genotypen in gleicher Häufigkeit (12,5 %) auftraten, währenddessen in der aktuellen Studie der Genotyp BB-A1A2-AA öfter vorkam als der Genotyp BC-A1A2-AA. Der Genotyp BC-A2A2-AA kam mit einer Häufigkeit von 9,52 % vor und war damit gleich häufig wie in der Studie von Mayer et al. (1997) vorzufinden, in der dieser Genotyp an der dritten Stelle lag und mit einer Frequenz von 9,5 % auftrat.

4.2 Haplotypfrequenzen

Bei den Untersuchungen der Pinzgauer traten zwei Varianten beim α_{s1} -Casein, vier beim β -Casein und vier beim κ -Casein auf. Somit wären insgesamt 32 verschiedene Haplotypen möglich ($2 \times 4 \times 4 = 32$). Aufgetreten sind 23 verschiedene α_{s1} - β - κ -Casein-Haplotypen. Die häufigsten Haplotypen sind in Tabelle 27 illustriert. Der häufigste α_{s1} - β - κ -Casein-Haplotyp ist der Haplotyp B-A1-A mit einer geschätzten Frequenz von 28,14 %.

Tabelle 27: Die häufigsten α_{s1} - β - κ -Casein-Haplotypen und deren geschätzte Frequenz

α_{s1} - β - κ -Casein-Haplotyp	Geschätzte Frequenz	Standardfehler
B - A1 - A	28,14 %	0,4642 %
B - A2 - A	25,05 %	0,5737 %
C - A2 - A	20,28 %	0,6355 %
B - A1 - B	9,68 %	0,4094 %
B - A2 - B	5,16 %	0,4776 %

C - A2 - B	4,72 %	0,4583 %
B - C - B	3,34 %	0,0856 %

Der α_{s1} - β -Casein-Haplotyp C-A1 kam mit einer geschätzten Häufigkeit von unter 1 % vor, während der α_{s1} - β -Casein-Haplotyp C-A2 mit einer geschätzten Frequenz von über 25 % auftrat. Da die α_{s1} -Casein-Variante C überwiegend mit der β -Casein-Variante A2 auftritt, kann das ein Hinweis darauf sein, dass diese Varianten häufig miteinander vererbt werden. Solch eine mögliche Kopplung beschrieben bereits Bech und Kristiansen (1990) zwischen der α_{s1} -Casein-Variante C, der β -Casein-Variante A2 und der κ -Casein-Variante B bei Jerseys. Auch in einer neueren Publikation von Poulsen et al. (2013) wurde über das gemeinsame Auftreten dieser drei Varianten bei dänischen Jerseys berichtet. Die Kopplung mit der κ -Casein-Variante B konnte bei den Pinzgauern nicht beobachtet werden, bei den Pinzgauern tritt die κ -Casein-Variante B aber auch wesentlich seltener auf.

Für das Braunvieh und Fleckvieh wurden ebenfalls Haplotypfrequenzen geschätzt (Schwarzenbacher, unveröffentlicht). Die Frequenzen beziehen sich auf die Kandidaten der genomischen Zuchtwertschätzung (Termine: 12/17, 01/18, 02/18, 03/18). Beim Fleckvieh trat der β - κ -Casein-Haplotyp A2-A mit 42,64 % am häufigsten auf. Betrachtet man bei den Pinzgauern ebenfalls nur den β - κ -Casein-Haplotyp, trat dieser mit 45,33 % ebenfalls am häufigsten auf und liegt damit in einem ähnlichen Bereich wie beim Fleckvieh. Beim Braunvieh hingegen war der Haplotyp A2-B der am öftesten vorkommende Haplotyp mit einer Frequenz von 74,28 %. Die κ -Casein-Variante B ist beim Braunvieh aber wesentlich häufiger als beim Pinzgauer-Rind und beim Fleckvieh. Der Haplotyp A2-A kam beim Braunvieh nur mit 11,46 % vor. Der Haplotyp A1-A trat mit 28,38 % beim Pinzgauer-Rind und 28,71 % beim Fleckvieh seltener als der Haplotyp A2-A auf. In einer Studie von Heck et al. (2009) kam der Haplotyp A2-A öfter, dafür der Haplotyp A1-A seltener vor als erwartet.

4.3 Unterschiede bei Milchleistungsmerkmalen

4.3.1 Effekt der α_{s1} -Casein-Genotypen auf Milchleistungsmerkmale

Unterschiede in der Milchmenge der verschiedenen α_{s1} -Casein-Genotypen sind statistisch nicht abgesichert ($p = 0,2484$). Die Eiweißmenge ($p = 0,2576$) und der Eiweißgehalt ($p = 0,2858$) unterschieden sich bei den verschiedenen Genotypen ebenfalls nicht signifikant voneinander.

Ein signifikanter Effekt des Genotyps wurde aber für die Merkmale Fettgehalt ($p = 0,0019$) sowie Fettmenge ($p = 0,0026$) festgestellt. Tabelle 28 gibt die LS-Mittelwerte, Standardfehler und p-Werte von Milchleistungsmerkmalen wieder.

Tabelle 28: LS-Mittelwerte, Standardfehler und Signifikanzniveau für α_{s1} -Casein-Genotypen und verschiedene Milchleistungsmerkmale

Milchleistungsmerkmal	Genotyp α_{s1} -Casein	Anzahl Tiere	LS-Mittelwert	Standardfehler	p-Wert
Milchmenge	BB ^a	405	-229,39	40,39	n.s.
	BC ^a	282	-254,17	42,86	
	CC ^a	51	-363,72	80,29	
Fettmenge	BB ^b	405	-5,59	1,52	**
	BC ^a	282	-9,39	1,61	
	CC ^a	51	-14,72	3,02	
Fettgehalt	BB ^a	405	0,0572	0,0118	**
	BC ^b	282	0,0171	0,0125	
	CC ^{ab}	51	0,0061	0,0234	
Eiweißmenge	BB ^a	405	-7,15	1,15	n.s.
	BC ^a	282	-8,31	1,22	
	CC ^a	51	-10,64	2,28	
Eiweißgehalt	BB ^a	405	0,0156	0,0072	n.s.
	BC ^a	282	0,0110	0,0076	
	CC ^a	51	0,0340	0,0142	

n.s. = nicht signifikant, * = $p < 0,05$ (signifikant), ** = $p < 0,01$ (hoch signifikant)

Verschiedene Hochbuchstaben beschreiben einen signifikanten Unterschied zwischen den Genotypen innerhalb eines Merkmals (Tukey-Test: $p < 0,05$)

Die aktuelle Untersuchung zeigte bezüglich der Milchleistungsmerkmale Vorteile des Genotyps BB gegenüber den Genotypen BC und CC. Kühe mit dem Genotyp BB hatten eine signifikant höhere Fettmenge als Rinder mit den Genotypen BC und CC. Der Fettgehalt war bei Tieren mit dem Genotyp BB signifikant höher als bei Kühen mit dem Genotyp BC. Die Fettmenge war auch in anderen Studien (Ng-Kwai-Hang et al., 1984; Aleandri et al., 1990) bei Kühen mit dem Genotyp BB höher. Kim et al. (1998) konnten wiederum keinen Zusammenhang zwischen der α_{s1} -Casein-Variante und der Fettmenge feststellen. Ein signifikanter Unterschied zeigte sich auch beim Fettgehalt, wobei andere Studien für dieses Merkmal keinen merklichen Unterschied feststellen konnten (Ng-Kwai-Hang et al., 1984; Aleandri et al., 1990; Kim et al., 1998). Die Ergebnisse, dass keine merklichen Unterschiede bei

Milch- und Eiweißmenge auftraten, stimmen mit der Arbeit von Kim et al. (1998) überein, nicht aber mit der Studie von Ng-Kwai-Hang et al. (1984), in der Kühe mit dem Genotyp BB eine höhere Milch- und Eiweißmenge hatten. Der Eiweißgehalt, der keine signifikanten Unterschiede zeigte, war bei Ng-Kwai-Hang et al. (1984) und Kim et al. (1998) ebenfalls nicht merklich unterschiedlich. Bei Aleandri et al. (1990) gab es aber merkliche Unterschiede beim Eiweißgehalt, wobei Tiere mit dem Genotyp BC einen höheren Gehalt hatten als Kühe mit dem Genotyp BB.

In der Literatur weist vermehrt die Variante B Vorteile bei den Milchleistungsmerkmalen auf, jedoch lassen sich durch die verschiedenen Ergebnisse in der Literatur keine eindeutigen Schlüsse ziehen. Durch die unterschiedlichen Resultate in bisherigen Studien ist nicht zu erwarten, dass ein signifikanter Effekt einer Casein-Variante auf ein Milchleistungsmerkmal auch wirklich einen kausalen Zusammenhang widerspiegelt. In der Literatur sind einige Publikationen zu finden, die Vorteile der Variante C gegenüber der Variante B für die Käseereitauglichkeit, wie eine kürzere Gerinnungszeit (Buchberger et al., 1996; Poulsen et al., 2013; Ketto et al., 2017) sowie eine bessere Gallertfestigkeit (Poulsen et al., 2013) feststellten.

4.3.2 Effekt der β -Casein-Genotypen auf Milchleistungsmerkmale

Es gab keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den verschiedenen β -Casein-Genotypen und der Milchmenge ($p = 0,4922$). Ebenso sind Unterschiede zwischen den Genotypen und der Eiweißmenge als zufällig bedingt einzustufen ($p = 0,4921$). Ein statistisch signifikanter Unterschied wurde hingegen bei Fettmenge ($p = 0,042$), Fettgehalt ($p = 0,0003$) und Eiweißgehalt ($p = 0,0392$) festgestellt. Die LS-Mittelwerte, Standardfehler und p-Werte von Milchleistungsmerkmalen sind in Tabelle 29 ersichtlich.

Tabelle 29: LS-Mittelwerte, Standardfehler und Signifikanzniveau für β -Casein-Genotypen und verschiedene Milchleistungsmerkmale

Milchleistungsmerkmal	Genotyp β -Casein	Anzahl Tiere	LS-Mittelwert	Standardfehler	p-Wert
Milchmenge	A1A1 ^a	149	-230,33	52,91	n.s.
	A1A2 ^a	373	-277,46	40,36	
	A2A2 ^a	282	-233,96	41,16	
Fettmenge	A1A1 ^b	149	-3,94	1,98	*
	A1A2 ^{ab}	373	-7,98	1,51	
	A2A2 ^a	282	-8,86	1,54	

Fettgehalt	A1A1 ^b	149	0,0782	0,0160	***
	A1A2 ^b	373	0,0496	0,0122	
	A2A2 ^a	282	0,0143	0,0124	
Eiweißmenge	A1A1 ^a	149	-6,38	1,50	n.s.
	A1A2 ^a	373	-8,04	1,15	
	A2A2 ^a	282	-7,94	1,17	
Eiweißgehalt	A1A1 ^{ab}	149	0,0264	0,0097	*
	A1A2 ^b	373	0,0255	0,0074	
	A2A2 ^a	282	0,0072	0,0075	

n.s. = nicht signifikant, * = $p < 0,05$ (signifikant), ** = $p < 0,01$ (hoch signifikant), *** = $p < 0,001$ (höchst signifikant)

Verschiedene Hochbuchstaben beschreiben einen signifikanten Unterschied zwischen den Genotypen innerhalb eines Merkmals (Tukey-Test: $p < 0,05$)

Pinzgauer-Rinder mit dem Genotyp A1A1 wiesen eine signifikant höhere Fettmenge als Tiere mit dem Genotyp A2A2 auf, die Differenz betrug 4,92 Fett-Kilogramm (LS-Mittelwerte). In den meisten Studien wurde jedoch bei der Fettmenge kein signifikanter Unterschied festgestellt (z.B. bei Kim et al., 1998; Ikonen et al., 1999; Heck et al., 2009). Bech und Kristiansen (1990) berichteten ein gegensätzliches Ergebnis: Kühe mit dem Genotyp A2A2 hatten in der zweiten Laktation Vorteile gegenüber Kühen mit dem Genotyp A1A1 bei der Fettmenge.

Der Fettgehalt war bei Rindern mit den Genotypen A1A1 und A1A2 merklich höher als bei Tieren, die Träger des Genotyps A2A2 waren. Dieses Ergebnis wurde auch bei Ikonen et al. (1999) festgestellt und bei Olenski et al. (2010) waren die Zuchtwerte für den Fettgehalt bei Tieren mit der Variante A1 höher als bei Tieren mit der Variante A2.

Beim Eiweißgehalt sind bei dieser Untersuchung Tiere mit dem mischerbigen Genotyp A1A2 signifikant besser als Rinder mit dem reinerbigen Genotyp A2A2. In den meisten älteren Studien gab es keine signifikanten Effekte der einzelnen Varianten bzw. Genotypen auf den Eiweißgehalt.

In einigen Publikationen fanden sich Vorteile der Variante A2 gegenüber der Variante A1 bei der Milchmenge (Ng-Kwai-Hang et al., 1984; Bech und Kristiansen, 1990; Ikonen et al., 1999; Olenski et al., 2010). In der aktuellen Untersuchung wurde kein signifikanter Unterschied festgestellt, jedoch ist ein leichter Vorteil des Genotyps A1A1 gegenüber dem Genotyp A2A2 sichtbar. In der Studie von Kučerová et al. (2006) hatten Tiere mit dem Genotyp A2A2 für die Milchmenge einen negativen, Tiere mit dem Genotyp A1A1 einen positiven Zuchtwert. Die Eiweißmenge wurde in dieser Untersuchung von den β -Casein-Genotypen nicht merklich

beeinflusst, in der Literatur finden sich jedoch einige Arbeiten mit Vorteilen des Genotyps A2A2 gegenüber dem Genotyp A1A1 (Bech und Kristiansen, 1990; Ikonen et al., 1999; Heck et al., 2009).

Die Ergebnisse in der Literatur sind zum Teil sehr unterschiedlich und erlauben daher nur eine beschränkte Aussage zu den kausalen Auswirkungen bestimmter Genorte. Einige Studien deuten darauf hin, dass sich die Variante A2 positiv auf die Milchmenge auswirkt, während die Variante A1 den Fettgehalt beeinflusst. In dieser Untersuchung zeigte die Variante A1 ebenfalls Vorteile durch einen höheren Fettgehalt gegenüber Variante A2. Mit dieser Untersuchung konnte jedoch nicht bestätigt werden, dass sich die Variante A2 positiv auf die Milchmenge auswirkt.

Bezüglich der Käseeritauglichkeit dürfte die Variante A1 gegenüber der Variante A2 vorteilhaft sein, da eine kürzere Labgerinnungszeit (Poulsen et al., 2013; Ketto et al., 2017) und eine bessere Gallertfestigkeit festgestellt wurden (Poulsen et al., 2013).

4.3.3 Effekt der κ -Casein-Genotypen auf Milchleistungsmerkmale

Es gab keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den verschiedenen Genotypen und der Fettmenge ($p = 0,2089$), dem Fettgehalt ($p = 0,0528$) und der Eiweißmenge ($p = 0,25$). Ein signifikanter Unterschied wurde jedoch bei der Milchmenge ($p = 0,033$) und dem Eiweißgehalt ($p = 0,0012$) festgestellt. In Tabelle 30 sind die LS-Mittelwerte, Standardfehler und p-Werte von Milchleistungsmerkmalen dargestellt.

Tabelle 30: LS-Mittelwerte, Standardfehler und Signifikanzniveau für κ -Casein-Genotypen und verschiedene Milchleistungsmerkmale

Milchleistungsmerkmal	Genotyp κ -Casein	Anzahl Tiere	LS-Mittelwert	Standardfehler	p-Wert
Milchmenge	AA ^b	470	-231,31	36,82	*
	AB ^{ab}	325	-292,29	41,32	
	BB ^a	44	-428,34	84,53	
Fettmenge	AA ^a	470	-7,63	1,39	n.s.
	AB ^a	325	-8,23	1,57	
	BB ^a	44	-13,23	3,20	
Fettgehalt	AA ^a	470	0,0295	0,0110	n.s.
	AB ^a	325	0,0549	0,0124	
	BB ^a	44	0,0654	0,0253	

Eiweißmenge	AA ^a	470	-7,55	1,05	n.s.
	AB ^a	325	-8,28	1,18	
	BB ^a	44	-11,44	2,41	
Eiweißgehalt	AA ^a	470	0,0109	0,0065	**
	AB ^b	325	0,0292	0,0073	
	BB ^b	44	0,0554	0,0150	

n.s. = nicht signifikant, * = $p < 0,05$ (signifikant), ** = $p < 0,01$ (hoch signifikant)

Verschiedene Hochbuchstaben beschreiben einen signifikanten Unterschied zwischen den Genotypen innerhalb eines Merkmals (Tukey-Test: $p < 0,05$)

Tiere mit dem Genotyp AA hatten eine signifikant höhere Milchmenge als jene mit dem Genotyp BB, wobei dieses Ergebnis widersprüchlich zu vielen Arbeiten ist, in denen kein signifikanter Unterschied festgestellt wurde (Ng-Kwai-Hang et al., 1984; Kim et al., 1998; Ikonen et al., 1999; Tsiaras et al., 2005). Rinder mit dem Genotyp BB zeigten einen signifikant höheren Eiweißgehalt als Tiere mit dem Genotyp AA, dieses Ergebnis stimmt mit mehreren Studien überein (Ng-Kwai-Hang et al., 1984; Aleandri et al., 1990; Ikonen et al., 1999; Tsiaras et al., 2005; Heck et al., 2009).

Die Variante B zeigte in vielen Publikationen Vorteile für die Käseerzeugbarkeit, zum Beispiel durch eine höhere Gallertfestigkeit und kürzere Labgerinnungszeit (Schaar, 1984; Kübarsepp et al., 2005; Poulsen et al., 2013).

4.3.4 Effekt der β -Lactoglobulin-Genotypen auf Milchleistungsmerkmale

Signifikante Differenzen ergaben sich bei der Milchmenge ($p = 0,0015$), der Fettmenge ($p = 0,0296$), der Eiweißmenge ($p = 0,0047$) sowie dem Fett- und Eiweißgehalt ($p = 0,0175$ und $p = 0,0201$). In Tabelle 31 sind die LS-Mittelwerte, Standardfehler und p-Werte von Milchleistungsmerkmalen sichtbar.

Tabelle 31: LS-Mittelwerte, Standardfehler und Signifikanzniveau für β -Lactoglobulin-Genotypen und verschiedene Milchleistungsmerkmale

Milchleistungsmerkmal	Genotyp β -Lactoglobulin	Anzahl Tiere	LS-Mittelwert	Standardfehler	p-Wert
Milchmenge	AB	114	82,97	57,50	**
	BB	468	-101,38	36,39	
Fettmenge	AB	114	2,35	2,16	*
	BB	468	-2,37	1,36	

Fettgehalt	AB	114	-0,0145	0,0172	*
	BB	468	0,0267	0,0109	
Eiweißmenge	AB	114	0,90	1,63	**
	BB	468	-3,73	1,03	
Eiweißgehalt	AB	114	-0,0250	0,0104	*
	BB	468	-0,0008	0,0066	

n.s. = nicht signifikant, * = $p < 0,05$ (signifikant), ** = $p < 0,01$ (hoch signifikant)

Die Milchmenge war bei Kühen mit dem Genotyp AB merklich höher als bei jenen mit dem Genotyp BB. Verglichen mit bisherigen Studien wurde zum Beispiel bei Tsiaras et al. (2005) zwischen den Genotypen AB und BB kein merklicher Unterschied entdeckt, dort wurde nur eine signifikante Differenz zwischen AA und AB festgestellt. In anderen Studien wurde ebenfalls kein Unterschied zwischen den Genotypen und der Milchmenge festgestellt (Ng-Kwai-Hang et al., 1984; Kim et al., 1998; Kučerová et al., 2006; Heck et al., 2009). Der Fettgehalt war bei Kühen des Genotyps BB merklich höher als bei Trägern des Genotyps AB, dieses Ergebnis ist im Einklang mit der Studie von Tsiaras et al. (2005). Kühe mit dem Genotyp AB produzierten merklich höhere Eiweißmengen als jene mit dem Genotyp BB. Dies kann durch die Studie von Tsiaras et al. (2005) nicht bestätigt werden, in der kein Unterschied festgestellt wurde. Kühe mit dem Genotyp BB wiesen einen merklich höheren Eiweißgehalt als der Genotyp AB auf. Bei Ng-Kwai-Hang et al. (1984) wurde ein signifikanter Unterschied zwischen den Genotypen wahrgenommen, jedoch war der Eiweißgehalt beim Genotyp BB am geringsten und bei AA am höchsten. Im Gegensatz dazu wurde bei Tsiaras et al. (2005) kein merklicher Unterschied für den Eiweißgehalt festgestellt. In einigen Publikationen wurden keine signifikanten Unterschiede bei den Milchleistungsmerkmalen entdeckt (Kim et al., 1998; Kučerová et al., 2006; Heck et al., 2009).

In der Literatur sind keine eindeutigen Ergebnisse zu finden und daher kann auch hier nicht davon ausgegangen werden, dass die beobachteten Zusammenhänge kausal sind. Zusammengefasst zeigt aber die aktuelle Untersuchung Vorteile des β -Lactoglobulin-Genotyps BB gegenüber dem Genotyp AB bei den Milchinhaltsstoffen, dafür weisen Kühe mit dem Genotyp AB eine höhere Milch-, Fett- und Eiweißmenge auf.

Interessant ist, dass die Variante B laut mehreren Arbeiten Vorteile für die Verarbeitung aufweist, wie zum Beispiel durch eine bessere Käseausbeute, einen höheren Caseingehalt und

eine höhere Hitzestabilität (Schaar et al., 1985; Aleandri et al., 1990; Buchberger et al., 1996; Keppler et al., 2014).

4.3.5 Effekt der β - κ -Casein-Genotypen auf Milchleistungsmerkmale

Da Milchleistungsmerkmale vom Casein-Haplotyp beeinflusst werden können (Heck et al., 2009), wurden die Berechnungen auch für den β - κ -Casein-Genotyp durchgeführt. Keine signifikanten Unterschiede der verschiedenen kombinierten β - κ -Casein-Genotypen ergaben sich für die Milchmenge ($p = 0,1446$), für die Fettmenge ($p = 0,2822$) und für die Eiweißmenge ($p = 0,7425$). Bei den Milchinhaltsstoffen Fett- und Eiweißgehalt wurden jedoch signifikante Unterschiede festgestellt ($p = 0,0008$ und $p = 0,0002$) (Tabelle 32).

Tabelle 32: LS-Mittelwerte, Standardfehler und Signifikanzniveau für β - κ -Casein-Genotypen und verschiedene Milchleistungsmerkmale

Milchleistungsmerkmal	Genotyp β - κ -Casein	Anzahl Tiere	LS-Mittelwert	Standardfehler	p-Wert
Milchmenge	A1A1-AA ^a	73	-215,62	70,10	n.s.
	A1A1-AB ^a	55	-268,14	78,24	
	A1A2-AA ^a	205	-275,17	48,64	
	A1A2-AB ^a	116	-316,47	57,86	
	A2A2-AA ^a	172	-169,84	48,93	
	A2A2-AB ^a	86	-333,01	65,13	
Fettmenge	A1A1-AA ^a	73	-4,50	2,65	n.s.
	A1A1-AB ^a	55	-4,25	2,96	
	A1A2-AA ^a	205	-8,09	1,84	
	A1A2-AB ^a	116	-9,34	2,19	
	A2A2-AA ^a	172	-7,51	1,85	
	A2A2-AB ^a	86	-10,79	2,47	
Fettgehalt	A1A1-AA ^b	73	0,0619	0,0208	***
	A1A1-AB ^b	55	0,0955	0,0232	
	A1A2-AA ^b	205	0,0466	0,0144	
	A1A2-AB ^b	116	0,0523	0,0172	
	A2A2-AA ^a	172	-0,0031	0,0145	
	A2A2-AB ^{ab}	86	0,0421	0,0193	
Eiweißmenge	A1A1-AA ^a	73	-6,84	2,02	n.s.
	A1A1-AB ^a	55	-6,47	2,26	
	A1A2-AA ^a	205	-7,82	1,40	
	A1A2-AB ^a	116	-9,01	1,67	
	A2A2-AA ^a	172	-6,95	1,41	

	A2A2-AB ^a	86	-9,29	1,88	
Eiweißgehalt	A1A1-AA ^{ab}	73	0,0128	0,0123	***
	A1A1-AB ^b	55	0,0425	0,0138	
	A1A2-AA ^b	205	0,0275	0,0086	
	A1A2-AB ^b	116	0,0297	0,0102	
	A2A2-AA ^a	172	-0,0099	0,0086	
	A2A2-AB ^b	86	0,0342	0,0115	

n.s. = nicht signifikant, *** = $p < 0,001$ (höchst signifikant)

Verschiedene Hochbuchstaben beschreiben einen signifikanten Unterschied zwischen den Genotypen innerhalb eines Merkmals (Tukey-Test: $p < 0,05$)

Beim Eiweißgehalt und beim Fettgehalt wiesen Träger des Genotyps A2A2-AA, wie in Tabelle 32 ersichtlich, die niedrigsten Gehalte auf. Das stimmt mit bisherigen Studien überein, die angeben, dass der Haplotyp A1-A den Fettgehalt erhöht (Ikonen et al., 2001; Heck et al., 2009; Bonfatti et al., 2010) und der Haplotyp A2-A einen geringeren Proteingehalt aufweist (Heck et al., 2009; Bonfatti et al., 2010). Tendenzen, die zeigen, dass der Proteingehalt von der κ -Casein-Variante B beeinflusst wird, sind auch bei der Pinzgauerpopulation erkennbar, da jene Haplotypen mit der κ -Casein-Variante B die höheren Eiweißgehalte aufwiesen (Ikonen et al., 2001).

4.3.6 Effekt der α_{s1} - β - κ -Casein-Genotypen auf Milchleistungsmerkmale

Es wurden signifikante Effekte der α_{s1} - β - κ -Casein-Genotypen auf den Fettgehalt festgestellt ($p = 0,0455$). Keine merklichen Unterschiede zwischen den Genotypen zeigten sich jedoch bei der Milchmenge ($p = 0,5310$), der Fettmenge ($p = 0,5737$), der Eiweißmenge ($p = 0,6597$) und dem Eiweißgehalt ($p = 0,3037$). In Tabelle 33 sind die LS-Mittelwerte, Standardfehler und p -Werte von Milchleistungsmerkmalen dargestellt.

Tabelle 33: LS-Mittelwerte, Standardfehler und Signifikanzniveau für α_{s1} - β - κ -Casein-Genotypen und verschiedene Milchleistungsmerkmale

Milchleistungsmerkmal	α_{s1} - β - κ -Casein-Genotyp	Anzahl Tiere	LS-Mittelwert	Standardfehler	p-Wert
Milchmenge	BB-A1A1-AA ^a	54	-204,57	79,49	n.s.
	BB-A1A2-AA ^a	102	-178,44	61,95	
	BB-A1A2-AB ^a	53	-334,04	79,36	
	BC-A1A2-AA ^a	72	-234,01	70,04	
	BC-A2A2-AA ^a	82	-205,47	64,07	

Fettmenge	BB-A1A1-AA ^a	54	-3,52	3,10	n.s.
	BB-A1A2-AA ^a	102	-4,98	2,42	
	BB-A1A2-AB ^a	53	-8,45	3,09	
	BC-A1A2-AA ^a	72	-7,05	2,73	
	BC-A2A2-AA ^a	82	-8,79	2,50	
Fettgehalt	BB-A1A1-AA ^{ab}	54	0,0697	0,0242	*
	BB-A1A2-AA ^{ab}	102	0,0336	0,0188	
	BB-A1A2-AB ^b	53	0,0772	0,0241	
	BC-A1A2-AA ^{ab}	72	0,0397	0,0213	
	BC-A2A2-AA ^a	82	-0,0023	0,0195	
Eiweißmenge	BB-A1A1-AA ^a	54	-6,17	2,33	n.s.
	BB-A1A2-AA ^a	102	-5,71	1,81	
	BB-A1A2-AB ^a	53	-9,64	2,32	
	BC-A1A2-AA ^a	72	-7,04	2,05	
	BC-A2A2-AA ^a	82	-7,70	1,87	
Eiweißgehalt	BB-A1A1-AA ^a	54	0,0157	0,0141	n.s.
	BB-A1A2-AA ^a	102	0,0088	0,0110	
	BB-A1A2-AB ^a	53	0,0307	0,0141	
	BC-A1A2-AA ^a	72	0,0207	0,0125	
	BC-A2A2-AA ^a	82	-0,0034	0,0114	

n.s. = nicht signifikant, * = $p < 0,05$ (signifikant)

Verschiedene Hochbuchstaben beschreiben einen signifikanten Unterschied zwischen den Genotypen innerhalb eines Merkmals (Tukey-Test: $p < 0,05$)

Da bei den meisten Rassen die Variante B in sehr hoher Frequenz, wie zum Beispiel bei der Rasse Holstein mit über 99 % (Heck et al., 2009; Gustavsson et al., 2014), vorkommt, werden die Haplotypen häufig ohne das α_{s1} -Casein angegeben. Sofern beim α_{s1} -Casein nicht ausschließlich die Variante B vorkommt, ist es aber interessant, das α_{s1} -Casein in den Haplotyp zu integrieren, da die Variante C positive Einflüsse auf die Käseereieigenschaft zeigt. So weist zum Beispiel in der Studie von Ketto et al. (2017) der kombinierte Genotyp BC-A2A2-BB signifikant bessere Labgerinnungseigenschaften auf als der Genotyp BB-A2A2-BB.

5 Schlussfolgerung

Im Zuge dieser Arbeit wurden Allel- und Genotypfrequenzen der verschiedenen Varianten beim α_{s1} -, β - und κ -Casein sowie beim β -Lactoglobulin geschätzt. Dafür wurden im Jahr 2017 441 Rinder der Rasse Pinzgauer untersucht, zusätzlich standen 593 Daten aus älteren Untersuchungen zur Verfügung. Zudem wurden Haplotypfrequenzen geschätzt. Außerdem wurde überprüft, ob die einzelnen Genotypen einen Einfluss auf Milchleistungsmerkmale haben. Es wurde auch getestet, ob zwischen reinrassigen Pinzgauer-Rindern und Pinzgauern mit Red Holstein-Anteil Unterschiede beim Auftreten der verschiedenen Genotypen vorliegen.

Beim Pinzgauer-Rind ist die α_{s1} -Casein-Variante B mit knapp 80 % die vorherrschende Variante, die Variante C kommt aber mit einer Häufigkeit von über 20 % in einem höheren Ausmaß als bei den Rassen Braunvieh, Fleckvieh und Holstein vor. Kühe mit dem Genotyp BB zeigten in der vorliegenden Arbeit eine signifikant höhere Fettmenge als Rinder mit den Genotypen BC und CC. Kühe mit dem Genotyp BB hatten außerdem einen signifikant höheren Fettgehalt als Tiere mit dem Genotyp BC. Die Variante C wird dafür in einigen Studien mit positiven Eigenschaften für die Käseereitauglichkeit in Verbindung gebracht.

Die genetische Variante A2 beim β -Casein tritt beim Pinzgauer-Rind am häufigsten auf. Dies ist aber kein Alleinstellungsmerkmal, da auch bei anderen Rassen in Österreich die Variante A2 am öftesten vorkommt. Der mischerbige Genotyp A1A2 liegt beim Pinzgauer-Rind mit fast 50 % am häufigsten vor und der Genotyp A2A2, welcher A2-Milch produziert, liegt bei circa 30 %. Es gab keine signifikanten Unterschiede beim Auftreten der Genotypen zwischen reinrassigen Pinzgauern und Pinzgauern mit Red Holstein-Anteil. Tiere mit dem Genotyp A1A1 hatten gegenüber Rindern mit dem Genotyp A2A2 einen signifikant höheren Fettgehalt und eine höhere Fettmenge. Pinzgauer-Rinder, die den Genotyp A1A2 aufwiesen, zeigten im Vergleich zum Genotyp A2A2 einen signifikant höheren Fett- und Eiweißgehalt. Die Variante A1 scheint daher bei diesen Merkmalen im Vergleich zur Variante A2 begünstigt zu sein.

Die bisherigen Studien zur Käseereitauglichkeit deuten auf Vorteile für die Variante A1 gegenüber der Variante A2 hin. Die Studien rund um das Thema A2-Milch stellen die gesundheitlichen Vorteile durch die A2-Milch dar. Problematisch ist allerdings, dass die bisherigen Humanstudien von der a2 Milk Company finanziell unterstützt bzw. finanziert

wurden, daher muss das Thema rund um die A2-Milch kritisch gesehen werden. Weitere Untersuchungen zur Käseereitauglichkeit der A2-Milch wären, ebenso wie unabhängige Untersuchungen zu Auswirkungen der A2-Milch auf die Gesundheit, interessant und wünschenswert.

Beim κ -Casein ist die genetische Variante A mit circa 78 % die vorherrschende Variante, Variante B tritt mit etwas mehr als 20 % seltener auf. Die Varianten E und G kommen mit sehr geringer Häufigkeit vor. Die Variante G ist insofern besonders, da sie bei der Rasse Pinzgauer entdeckt wurde. Tiere mit dem Genotyp AA, der beim Pinzgauer-Rind am häufigsten nachgewiesen wurde, wiesen eine signifikant höhere Milchleistung als jene mit dem Genotyp BB auf, Rinder mit den Genotypen AB und BB zeigten dafür einen merklich höheren Proteingehalt als jene mit dem Genotyp AA. Die Variante B, die beim Pinzgauer-Rind nur einen Anteil von etwas mehr als 20 % aufweist, wird sehr häufig mit positiven Käseereieigenschaften in Verbindung gebracht.

Die β -Lactoglobulin-Variante B wies bei den untersuchten Tieren einen Wert von 92 % auf und auch der geschätzte Wert mit 86 % verdeutlicht, dass diese Variante vorherrschend in der Pinzgauerpopulation ist und die Variante A in weit geringerem Ausmaß vorkommt. Beim β -Lactoglobulin wurde ein signifikanter Unterschied im Auftreten der Genotypen zwischen reinrassigen Pinzgauer-Rindern und Pinzgauern mit Red Holstein-Anteil festgestellt. Der Grund dafür liegt in der unterschiedlichen Häufigkeit der Varianten, da das B-Allel beim Pinzgauer-Rind in einem viel höheren Ausmaß auftritt als bei der Rasse Holstein. Kühe mit dem Genotyp BB wiesen gegenüber jenen mit dem Genotyp AB signifikante Vorteile bei den Milch Inhaltsstoffen auf, Kühe mit dem Genotyp AB hatten dafür eine signifikant höhere Milch-, Fett- und Eiweißmenge. Variante B, die beim Pinzgauer-Rind größtenteils vorkommt, zeigte bei mehreren Studien im Vergleich zur Variante A positive Eigenschaften für die Käseereitauglichkeit.

Die Betrachtung des kombinierten α_{s1} - β - κ -Casein-Genotyps bzw. des Haplotyps bringt Vorteile, da die Caseine eng beieinander liegen und somit Haplotypen meist ohne Rekombination vererbt werden. Die Ergebnisse zu den Milchleistungsmerkmalen der einzelnen Caseine müssen daher kritisch betrachtet werden. Der Haplotyp B-A1-A kommt mit 28,1 % am häufigsten vor, gefolgt vom Haplotyp B-A2-A mit 25,05 %. Der α_{s1} - β -Casein-Haplotyp C-A2 (über 25 %) tritt viel häufiger auf als der α_{s1} - β -Casein-Haplotyp C-A1 (unter 1

%). Daraus kann geschlossen werden, dass die α_{s1} -Casein-Variante C besonders häufig mit der β -Casein-Variante A2 vererbt wird.

Beim β - κ -Casein-Genotyp wurden signifikante Unterschiede bei den Milchinhaltsstoffen festgestellt, wobei sowohl beim Fett- als auch Proteingehalt der Genotyp A2A2-AA die niedrigsten Gehalte aufwies. Die aktuelle Untersuchung deutet darauf hin, dass der Haplotyp A1-A den Fettgehalt erhöht. Beim Proteingehalt gibt es Tendenzen, dass die κ -Casein-Variante B den Proteingehalt beeinflusst.

Die beobachteten Zusammenhänge zwischen den Casein-Varianten bzw. β -Lactoglobulin-Varianten und Leistungsmerkmalen müssen aber nicht kausal sein.

6 Literaturverzeichnis

a2 Milk Company (s.a.). About us. <https://thea2milkcompany.com/about-us/> (29.01.2018).

Aleandri R., Buttazzoni L. G., Schneider J. C., Caroli A. und Davoli R. (1990). The Effects of Milk Protein Polymorphism on Milk Components and Cheese-Producing Ability. *Journal of Dairy Science*, Vol. 73, 241-255.

Bech A.-M. und Kristiansen K. R. (1990). Milk protein polymorphism in Danish dairy cattle and the influence of genetic variants on milk yield. *Journal of Dairy Research*, Vol. 57, 53-62.

Bonfatti V., Di Martino G., Cecchinato A., Vicario D. und Carnier P. (2010). Effects of β - κ -casein (CSN2-CSN3) haplotypes and β -lactoglobulin (BLG) genotypes on milk production traits and detailed protein composition of individual milk of Simmental cows. *Journal of Dairy Science*, Vol. 93, No. 8, 3797-3808.

Buchberger J., Biechl C., Miller M., Uth M. und Willeke H. (2004). Einfluss der Rasse auf die Käseereitauglichkeit der Milch. *dmz Lebensmittelindustrie und Milchwirtschaft*, 125, Nr. 11., 26-29.

Buchberger J., Krause I. und Biechl C. (1996). Zum Vorkommen der genetischen Varianten der Milchproteine beim Pinzgauer Rind. *Mitteilungsblatt der ARGE Pinzgauer*, Nr. 158/159, 18-19.

Caroli A., Chessa S., Bolla P., Budelli E. und Gandini G. C. (2004). Genetic structure of milk protein polymorphisms and effects on milk production traits in a local dairy cattle. *Journal of Animal Breeding and Genetics*, Vol. 121, 119-127.

Caroli A. M., Chessa S. und Erhardt G. J. (2009). Invited review: Milk protein polymorphisms in cattle: Effect on animal breeding and human nutrition. *Journal of Dairy Science*, Vol. 92, No. 11, 5335-5352.

Caroli A., Rizzi R., Lühken G. und Erhardt G. (2010). Short communication: Milk protein genetic variation and casein haplotype structure in the Original Pinzgauer cattle. *Journal of Dairy Science*, Vol. 93, No. 3, 1260-1265.

Cieślińska A., Kamiński S., Kostyra E. und Sienkiewicz-Szlapka E. (2007). Beta-casomorphin 7 in raw and hydrolyzed milk derived from cows of alternative β -casein genotypes. *Milchwissenschaft*, Vol. 62, No. 2.

De Noni I. (2008). Release of β -casomorphins 5 and 7 during simulated gastro-intestinal digestion of bovine β -casein variants and milk-based infant formulas. *Food Chemistry*, Vol. 110, 897-903.

Deutinger B. (2015). ÖPUL-Maßnahme „Seltene Nutztierassen“ - Information zu den Förderungseckpunkten der Rasse Original Pinzgauer. *Pinzgauer Aktuell*, Nr. 236/237, 16-17.

Elliott R. B., Harris D. P., Hill J. P., Bibby N. J. und Wasmuth H. E. (1999). Type I (insulin-dependent) diabetes mellitus and cow milk: casein variant consumption. *Diabetologia*, Vol. 42, 292-296.

Erhardt G. (1989). κ -Kaseine in Rindermilch – Nachweis eines weiteren Allels (κ -Cn^E) in verschiedenen Rassen. *Journal of Animal Breeding and Genetics*, Vol. 106, 223-231.

Erhardt G. (1996). Detection of a new κ -casein variant in milk of Pinzgauer cattle. *Animal Genetics*, Vol. 27, 105-107.

European Food Safety Authority (2009). Review of the potential health impact of β -casomorphins and related peptides. *EFSA Scientific Report* 231, 1-107.

Farrell H. M., Jr., Jimenez-Flores R., Bleck G. T., Brown E. M., Butler J. E., Creamer L. K., Hicks C. L., Hollar C. M., Ng-Kwai-Hang K. F. und Swaisgood H. E. (2004). Nomenclature of the Proteins of Cows' Milk – Sixth Revision. *Journal of Dairy Science*, Vol. 87, No. 6, 1641-1674.

Gallinat J. L., Qanbari S., Drögemüller C., Pimentel E. C. G., Thaller G. und Tetens J. (2013). DNA-based identification of novel bovine casein gene variants. *Journal of Dairy Science*, Vol. 96, No. 1, 699-709.

Garrick D. J., Taylor J. F. und Fernando R. L. (2009). Deregressing estimated breeding values and weighting information for genomic regression analyses. *Genetics Selection Evolution*, 41:55.

Gengler N., Mayeres P. und Szydlowski M. (2007). A simple method to approximate gene content in large pedigree populations: application to the myostatin gene in dual-purpose Belgian Blue cattle. *Animal*, Vol. 1, 21-28.

Gustavsson F., Buitenhuis A. J., Johansson M., Bertelsen H. P., Glantz M., Poulsen N. A., Lindmark Månsson H., Stålhammar H., Larsen L. B., Bendixen C., Paulsson M. und Andrén A. (2014). Effects of breed and casein genetic variants on protein profile in milk from Swedish Red, Danish Holstein, and Danish Jersey cows. *Journal of Dairy Science*, Vol. 97, No. 6, 3866-3877.

Hayes H. C. und Petit E. J. (1993). Mapping of the β -lactoglobulin gene and of an immunoglobulin M heavy chain-like sequence to homoeologous cattle, sheep, and goat chromosomes. *Mammalian Genome* 4, 207-210.

He M., Sun J., Jiang Z. Q. und Yang Y. X. (2017). Effects of cow's milk beta-casein variants on symptoms of milk intolerance in Chinese adults: a multicentre, randomised controlled study. *Nutrition Journal*, 16:72.

Heck J. M. L., Schennink A., Van Valenberg H. J. F., Bovenhuis H., Visker M. H. P. W., Van Arendonk J. A. M. und Van Hooijdonk A. C. M. (2009). Effects of milk protein variants on the protein composition of bovine milk. *Journal of Dairy Science*, Vol. 92, No. 3, 1192-1202.

Ho S., Woodford K., Kukuljan S. und Pal. S. (2014). Comparative effects of A1 versus A2 beta-casein on gastrointestinal measures: a blinded randomised cross-over pilot study. *European Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 68, 994-1000.

Ikonen T., Bovenhuis H. und Ojala M. (2001). Associations Between Casein Haplotypes and First Lactation Milk Production Traits in Finnish Ayrshire Cows. *Journal of Dairy Science*, Vol. 84, No. 2, 507-514.

Ikonen T., Ojala M. und Ruottinen O. (1999). Associations Between Milk Protein Polymorphism and First Lactation Milk Production Traits in Finnish Ayrshire Cows. *Journal of Dairy Science*, Vol. 82, No. 5, 1026-1033.

Jianqin S., Leiming X., Lu X., Yelland G. W., Ni J. und Clarke A. J. (2016). Effects of milk containing only A2 beta casein versus milk containing both A1 and A2 beta casein proteins on gastrointestinal physiology, symptoms of discomfort, and cognitive behavior of people with self-reported intolerance to traditional cows' milk. *Nutrition Journal*, 15:35.

Jinsmaa Y. und Yoshikawa M. (1999). Enzymatic release of neocasomorphin and β -casomorphin from bovine β -casein. *Peptides*, Vol. 20, 957-962.

Kamiński S., Kostyra E., Cieślińska A. und Fiedorowicz E. (2012). Consumption of bovine β -casein variants (A1 or A2) does not affect basic hematological and biochemical indices. *Milchwissenschaft*, Vol. 67, No. 3, 238-241.

Keppler J. K., Sönnichsen F. D., Lorenzen P.-C. und Schwarz K. (2014). Differences in heat stability and ligand binding among β -lactoglobulin genetic variants A, B and C using ^1H NMR and fluorescence quenching. *Biochimica et Biophysica Acta*, Vol. 1844, 1083-1093.

Ketto I. A., Knutsen T. M., Øyaas J., Heringstad B., Ådnøy T., Devold T. G. und Skeie S. B. (2017). Effects of milk protein polymorphism and composition, casein micelle size and salt distribution on the milk coagulation properties in Norwegian Red cattle. *International Dairy Journal*, Vol. 70, 55-64.

Kim S., Ng-Kwai-Hang K. F. und Hayes J. F. (1998). The Relationship between Milk Protein Phenotypes and Lactation Traits in Brown Swiss and Canadienne. *AJAS*, Vol. 11, No. 3, 311-317.

Kübarepp I., Henno M., Viinalass H. und Sabre D. (2005). Effect of κ -casein and β -lactoglobulin genotypes on the milk rennet coagulation properties. *Agronomy Research*, Vol. 3, No. 1, 55-64.

Kučerová J., Matějček A., Jandurová O. M., Sørensen P., Němcová E., Štípková M., Kott T., Bouška J. und Frelich J. (2006). Milk protein genes CSN1S1, CSN2, CSN3, LGB and their relation to genetic values of milk production parameters in Czech Fleckvieh. *Czech Journal of Animal Science*, Vol. 51, No. 6, 241-247.

Max-Rubner-Institut (2016). Wissenschaftliche Bewertung der A1-A2-Milch. https://www.mri.bund.de/de/aktuelles/meldungen/meldungen-einzelansicht/?tx_news_pi1%5Bnews%5D=159&cHash=f3abda586c361333628edc13e4496007 (14.02.2018).

Mayer H. (s.a.). Technologie der Milch. Unterlagen zur Vorlesung (417,456) VO 752.336. Universität für Bodenkultur, Wien.

Mayer H. K., Marchler A., Prohaska C. und Norz R. (1997). Milk protein polymorphism in Austrian dairy cattle breeds. *Milchwissenschaft*, Vol. 52, No. 7, 366-369.

Mayer H. K. und Tschertou M. (2003). Typisierung genetischer Milchproteinvarianten bei seltenen Rinderrassen in Österreich. Forschungsbericht Universität für Bodenkultur, Wien.

McLachlan C. N. S. (2001). β -casein A¹, ischaemic heart disease mortality, and other illnesses. *Medical Hypotheses*, Vol. 56, No. 2, 262-272.

Miluchová M., Gábor M. und Trakovická A. (2014). Analysis of Beta-Casein Gene (CSN2) Polymorphism in Different Breeds of Cattle. *Animal Science and Biotechnologies*, Vol. 47, No. 2, 56-59.

MiX99 Development Team (2015). MiX99: A software package for solving large mixed model equations. Release VIII/2015. Natural Resources Institute Finland (Luke). URL: <http://www.luke.fi/mix99>.

Ng-Kwai-Hang K. F. und Grosclaude F. (1992). Genetic Polymorphism of Milk Proteins. In: *Advanced dairy chemistry – 1: Proteins* (Hrsg. P.F. Fox), Elsevier Applied Science, London und New York, 405-455.

Ng-Kwai-Hang K. F., Hayes J. F., Moxley J. E. und Monardes H. G. (1984). Association of Genetic Variants of Casein and Milk Serum Proteins with Milk, Fat, and Protein Production by Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*, Vol. 67, 835-840.

O'Donnell L. J. D., Virjee J. und Heaton K. W. (1990). Detection of pseudodiarrhoea by simple clinical assessment of intestinal transit rate. *BMJ*, Vol. 300, 439-440.

Olenski K., Kamiński S., Szyda J. und Cieslinksa A. (2010). Polymorphism of the beta-casein gene and its associations with breeding value for production traits of Holstein-Friesian bulls. *Journal of Livestock Science*, Vol. 131, 137-140.

Potočnik K., Luštrek B. und Kaić A. (2016). Does the selection on SS-casein affect the traits important for dairy production of Slovenian Brown Swiss Cattle? *Acta argiculturae Slovenica*, Supplement 5, 89–93.

Poulsen N. A., Bertelsen H. P., Jensen H. B., Gustavsson F., Glantz M., Lindmark Månsson H., Andrén A., Paulsson M., Bendixen C., Buitenhuis A. J. und Larsen L. B. (2013). The occurrence of noncoagulating milk and the association of bovine milk coagulation properties with genetic variants of the caseins in 3 Scandinavian dairy breeds. *Journal of Dairy Science*, Vol. 96, No. 8, 4830-4842.

Schaar J. (1984). Effects of κ -casein genetic variants and lactation number on the renneting properties of individual milks. *Journal of Dairy Research*, Vol. 51, 397-406.

Schaar J., Hansson B. und Pettersson H.-E. (1985). Effects of genetic variants of κ -casein and β -lactoglobulin on cheesemaking. *Journal of Dairy Research*, Vol. 52, 429-437.

Stephens M. und Scheet P. (2005). Accounting for decay of linkage disequilibrium in haplotype inference and missing-data imputation. *American Journal of Human Genetics* 76, 449-462.

Stephens M., Smith N. J. und Donnelly P. (2001). A New Statistical Method for Haplotype Reconstruction from Population Data. *American Journal of Human Genetics* 68, 978-989.

Stöckl H. (2014). *Pinzgauer – Eine österreichische Rinderrasse mit Tradition*. 2. Auflage, Maishofen: ARGE Pinzgauer-Rinderzuchtverbände.

Swaigood H. E. (1992). Chemistry of the Casein. In: Advanced dairy chemistry – 1: Proteins (Hrsg. P.F. Fox), Elsevier Applied Science, London and New York, 63-110.

Threadgill D. W. und Womack J. E. (1990). Genomic analysis of the major bovine milk protein genes. *Nucleic Acids Research*, Vol. 18, No. 23, 6935-6941.

Truswell A. S. (2005). The A2 milk case: a critical review. *European Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 59, 623-631.

Tsiaras A. M., Bargouli G. G., Banos G. und Boscos C. M. (2005). Effect of Kappa-Casein and Beta-Lactoglobulin Loci on Milk Production Traits and Reproductive Performance of Holstein Cows. *Journal of Dairy Science*, Vol. 88, No. 1, 327-334.

Ul Haq M. R., Kapila R., Sharma R., Saliganti V. und Kapila S. (2014). Comparative evaluation of cow β -casein variants (A1/A2) consumption on Th₂-mediated inflammatory response in mouse gut. *European Journal of Nutrition*, Vol. 53, 1039-1049.

Van Eenennaam A. und Medrano J. F. (1991). Milk Protein Polymorphisms in California Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*, Vol. 74, No. 5, 1730-1742.

Visker M. H. P. W., Dibbits B. W., Kinders S. M., Van Valenberg H. J. F., Van Arendonk J. A. M. und Bovenhuis H. (2010). Association of bovine β -casein protein variant I with milk production and milk protein composition. *Animal Genetics*, Vol. 42, 212-218.

Wedholm A., Larsen L. B., Lindmark-Månsson H., Karlsson A. H. und Andrén A. (2006). Effect of Protein Composition on the Cheese-Making Properties of Milk from Individual Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, Vol. 89, No. 9, 3296-3305.

Willam A. (2011). Tierzucht. Unterlagen für die Bachelor-Studien Agrarwissenschaften (LV 932.102) und Pferdewissenschaften (LV 932.120). 4. neu überarbeitete Auflage. Universität für Bodenkultur, Wien.

ZAR (2016). Die österreichische Rinderzucht 2016. Zentrale Arbeitsgemeinschaft österreichischer Rinderzüchter, Wien.

Zhang K., Sun F. und Zhao H. (2004). HAPLORE - A program for Haplotype Reconstruction in General Pedigrees without Recombination Events and Genotyping Errors (Updated Version).

Zhang K., Sun F. und Zhao H. (2005). HAPLORE: a program for haplotype reconstruction in general pedigrees without recombination. *Bioinformatics*, Vol. 21, No. 1, 90-103.

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Allelfrequenzen der α_{s1} -Casein-Varianten in verschiedenen Untersuchungen beim Pinzgauer-Rind	4
Tabelle 2: Allelfrequenzen der β -Casein-Varianten in verschiedenen Untersuchungen beim Pinzgauer-Rind	8
Tabelle 3: Allelfrequenzen der κ -Casein-Varianten in verschiedenen Untersuchungen beim Pinzgauer-Rind	15
Tabelle 4: Allelfrequenzen der β -Lactoglobulin-Varianten in verschiedenen Untersuchungen beim Pinzgauer-Rind	20
Tabelle 5: Probenübersicht für α_{s1} -, β -, κ -Casein und β -Lactoglobulin	23
Tabelle 6: Darstellung der α_{s1} -Casein-Varianten und Allelfrequenzen sowie α_{s1} -Casein-Genotypen und Genotypfrequenzen der untersuchten Tiere (n = 231)	28
Tabelle 7: Frequenzschätzwerte der α_{s1} -Casein-Varianten in der Pinzgauerpopulation nach dem Ansatz von Gengler et al. (2007)	29
Tabelle 8: Darstellung der α_{s1} -Casein-Allelfrequenzen bei Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern (n = 193) und Pinzgauern mit RF-Anteil > 6,25 % (n = 35)	30
Tabelle 9: Darstellung der α_{s1} -Casein-Genotypen und Genotypfrequenzen bei Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern (n = 193) und Pinzgauern mit RF-Anteil > 6,25 % (n = 35)	30
Tabelle 10: Darstellung der α_{s1} -Casein-Genotypen und Genotypfrequenzen unter Berücksichtigung älterer Studien ¹ bei Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern (n = 585) und Pinzgauern mit RF-Anteil > 6,25 % (n = 198)	31
Tabelle 11: Darstellung der β -Casein-Varianten und Allelfrequenzen sowie β -Casein-Genotypen und Genotypfrequenzen der untersuchten Tiere (n = 441)	31
Tabelle 12: Frequenzschätzwerte der β -Casein-Varianten in der Pinzgauerpopulation nach dem Ansatz von Gengler et al. (2007)	33
Tabelle 13: Darstellung der β -Casein-Allelfrequenzen bei Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern (n = 340) und Pinzgauern mit RF-Anteil > 6,25 % (n = 86)	34
Tabelle 14: Darstellung der β -Casein-Genotypen und Genotypfrequenzen bei Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern (n = 340) und Pinzgauern mit RF-Anteil > 6,25 % (n = 86)	34
Tabelle 15: Darstellung der β -Casein-Genotypen und Genotypfrequenzen unter Berücksichtigung älterer Studien ¹ mit Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern (n = 722) und Pinzgauern mit RF-Anteil > 6,25 % (n = 248)	35
Tabelle 16: Darstellung der κ -Casein-Varianten und Allelfrequenzen sowie κ -Casein-Genotypen und Genotypfrequenzen der untersuchten Tiere (n = 364)	35
Tabelle 17: Frequenzschätzwerte der κ -Casein-Varianten in der Pinzgauerpopulation nach dem Ansatz von Gengler et al. (2007)	37
Tabelle 18: Darstellung der κ -Casein-Allelfrequenzen bei Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern (n = 309) und Pinzgauern mit RF-Anteil > 6,25 % (n = 52)	38

Tabelle 19: Darstellung der κ -Casein-Genotypen und Genotypfrequenzen bei Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern (n = 309) und Pinzgauern mit RF-Anteil > 6,25 % (n = 52)	38
Tabelle 20: Darstellung der κ -Casein-Genotypen und Genotypfrequenzen unter Berücksichtigung älterer Studien ¹ mit Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern (n = 707) und Pinzgauern mit RF-Anteil > 6,25 % (n = 216)	38
Tabelle 21: Darstellung der β -Lactoglobulin-Varianten und Allelfrequenzen sowie β -Lactoglobulin-Genotypen und Genotypfrequenzen der untersuchten Tiere (n = 231)	39
Tabelle 22: Frequenzschätzwerte der β -Lactoglobulin-Varianten in der Pinzgauerpopulation nach dem Ansatz von Gengler et al. (2007)	40
Tabelle 23: Darstellung der β -Lactoglobulin-Allelfrequenzen bei Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern (n = 193) und Pinzgauern mit RF-Anteil > 6,25 % (n = 35)	41
Tabelle 24: Darstellung der β -Lactoglobulin-Genotypen und Genotypfrequenzen bei Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern (n = 193) und Pinzgauern mit RF-Anteil > 6,25 % (n = 35)	41
Tabelle 25: Darstellung der β -Lactoglobulin-Genotypen und Genotypfrequenzen unter Berücksichtigung älterer Studien ¹ mit Unterscheidung von reinrassigen Pinzgauern (n = 458) und Pinzgauern mit RF-Anteil > 6,25 % (n = 135)	41
Tabelle 26: Darstellung der häufigsten α_{s1} - β - κ - und β - κ -Casein-Genotypen	42
Tabelle 27: Die häufigsten α_{s1} - β - κ -Casein-Haplotypen und deren geschätzte Frequenz	42
Tabelle 28: LS-Mittelwerte, Standardfehler und Signifikanzniveau für α_{s1} -Casein-Genotypen und verschiedene Milchleistungsmerkmale	44
Tabelle 29: LS-Mittelwerte, Standardfehler und Signifikanzniveau für β -Casein-Genotypen und verschiedene Milchleistungsmerkmale	45
Tabelle 30: LS-Mittelwerte, Standardfehler und Signifikanzniveau für κ -Casein-Genotypen und verschiedene Milchleistungsmerkmale	47
Tabelle 31: LS-Mittelwerte, Standardfehler und Signifikanzniveau für β -Lactoglobulin-Genotypen und verschiedene Milchleistungsmerkmale	48
Tabelle 32: LS-Mittelwerte, Standardfehler und Signifikanzniveau für β - κ -Casein-Genotypen und verschiedene Milchleistungsmerkmale	50
Tabelle 33: LS-Mittelwerte, Standardfehler und Signifikanzniveau für α_{s1} - β - κ -Casein-Genotypen und verschiedene Milchleistungsmerkmale	51