

Einfluss von Genotyp, Haltungssystem und Geburtseinleitung auf Vitalität und
metabolische Parameter bei Ferkeln verschiedener Gewichtsklassen unmittelbar post
natum bis zum Absetztermin

INAUGURAL-DISSERTATION
zur Erlangung des Grades eines
Dr. med. vet.
beim Fachbereich Veterinärmedizin
der Justus-Liebig-Universität Gießen

Heinke Margarit Elke Lickfett

Aus dem Klinikum Veterinärmedizin
Tierklinik für Reproduktionsmedizin und Neugeborenenkunde
der Justus-Liebig-Universität Gießen
Betreuer: Prof. em. Dr. med. vet. Dr. h.c. mult. Hartwig Bostedt

und dem

Forschungsinstitut für Nutztierbiologie (FBN)
Betreuer: Prof. Dr. rer. nat. Klaus Wimmers

**Einfluss von Genotyp, Haltungssystem und Geburtseinleitung auf Vitalität und
metabolische Parameter bei Ferkeln verschiedener Gewichtsklassen
unmittelbar *post natum* bis zum Absetztermin**

INAUGURAL-DISSERTATION
zur Erlangung des Grades einer Doktorin der Veterinärmedizin
- Doctor medicinae veterinariae –
(Dr. med. vet.)
beim Fachbereich Veterinärmedizin
der Justus-Liebig-Universität Gießen

eingereicht von
Heinke Margarit Elke Lickfett

Mit Genehmigung des Fachbereiches Veterinärmedizin
der Justus-Liebig-Universität Gießen

Dekan: Prof. Dr. Dr. Stefan Arnhold

1. Gutachter: Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Bostedt

2. Gutachter: Prof. Dr. Wimmers

3. Gutachter: Prof. Dr. Dr. habil. Reiner

Tag der Disputation: 11.02.2026

Inhalt

1 Einleitung	1
2 Literaturübersicht.....	2
2.1 Intrinsische Herausforderungen der neonatalen Anpassung beim Schwein	2
2.2 Allgemeine Angaben über die verschiedenen Einflussfaktoren auf die Ferkelvitalität unmittelbar <i>post natum</i>	4
2.3 Einfluss von Genetik auf Geburtsverlauf und Aufzuchtleistung.....	5
2.4 Einfluss der Haltungssysteme auf reproduktionsrelevante Parameter von Sau und Ferkel im peripartalen Zeitraum	7
2.5 Auswirkungen der Geburtseinleitung auf den Geburtsverlauf und die Neonaten.....	9
2.6 Relevanz des Geburtsgewichts für das postnatale Überleben.....	11
2.7 Charakteristika der Deutschen Landrasse und des Deutschen Sattelschweins.....	13
3 Problemstellungen und Ziele	15
4 Eigenanteil an der Untersuchung	16
5 Publikationen.....	17
5.1 Publikation 1	17
5.2 Publikation 2	33
6 Diskussion.....	50
6.1 Diskussion der Ergebnisse.....	50
6.1.1 Beeinflussung von Stoffwechsel und Organreife durch das Geburtsgewicht	50
6.1.1.1 Gegenüberstellung von Stoffwechseln von hypotrophen Ferkeln und solchen mit IUGR-Symptomatik	51
6.1.1.2 Ansätze zur Verbesserung des Überlebens von hypotrophen Ferkeln	52
6.1.2 Einfluss der Rasse auf Geburtsgewicht, klinische Parameter und Organreife der Ferkel	53
6.1.2.1 Rasseabhängigkeit der Wurfgröße und des Geburtsgewichts	53
6.1.2.2 Effekte der Rasse auf klinische Parameter.....	55
6.1.2.3 Bedeutung der Rasse für die Organreife der Ferkel	56
6.1.3 Auswirkungen des Haltungssystems auf die Saugferkelverluste und den Energistoffwechsel der Ferkel	58
6.1.3.1 Zusammenhang zwischen Saugferkelverlusten und Haltungssystem	58

6.1.3.2 Einfluss des Haltungssystems auf den Metabolismus der Ferkel	58
6.1.3.3 Chancen und Herausforderungen weiterer Haltungssysteme.....	59
6.1.4 Folgen der Geburtsinduktion für die Organreife der Ferkel	61
6.2 Diskussion der Methodik	62
7 Fazit	64
8 Zusammenfassung	65
9 Conclusion	67
10 Literaturverzeichnis	69
Danksagung	85
Selbstständigkeitserklärung.....	86
Anhang.....	87

Abkürzungsverzeichnis

B	Rasse (engl.: <i>breed</i>)
BMI	Body-Maß-Index
BW	Körpergewicht (engl.: <i>body weight</i>)
BWC	Geburtsgewichtsklasse (engl.: <i>birth weight class</i>)
CP	Rohprotein (engl.: <i>crude protein</i>)
crate	Kastenstand
CV	Variationskoeffizient (engl.: <i>coefficient of variation</i>)
DM	Trockenmasse (engl.: <i>dry matter</i>)
dpc	Tage nach der Konzeption (engl.: <i>days post conceptionem</i>)
F	Abferkelumgebung (engl.: <i>farrowing environment</i>)
FBN	Forschungsinstitut für Nutztierbiologie
GL	Deutsche Landrasse (engl.: <i>German Landrace</i>)
GS	Deutsches Sattelschwein (engl.: <i>German Saddleback</i>)
H	Haltungssystem (engl.: <i>housing system</i>)
HPLC	Hochleistungsflüssigchromatographie (engl.: <i>high-performance liquid chromatography</i>)
I	Geburtsinduktion (engl.: <i>parturition induction</i>)
IUGR	Intrauterine Wachstumsreduktion/-restriktion (engl.: <i>intrauterine growth restriction/retardation</i>)
K-EDTA	Kalium-Ethylendiamintetraazetat
ME	Metabolische Energie (engl.: <i>metabolizable energy</i>)
NEFA	unveresterte Fettsäuren (engl.: <i>non-esterified fatty acids</i>)
pen	Bewegungsbucht
PGF _{2α} /PGF	Prostaglandin F _{2α}
pH	<i>pondus hydrogenii</i>
PI	Ponderal-Index

PLSDA	partielle kleinste Quadratdiskriminanzanalyse (engl.: <i>partial least squares discriminant analysis</i>)
p.n.	<i>post natum</i>
SEM	Standardfehler (engl.: <i>standard error of the mean</i>)
V.	<i>Vena</i>

1 Einleitung

In Schweinezuchtbeständen werden national und international zunehmend Rassen und Linien eingesetzt, die unter reproduktiven Aspekten als hochproliverativ zu bezeichnen sind. Durch züchterische Programme ist es gelungen, innerhalb eines relativ kurzen Zeitraums die Wurfgrößen von 13,7 Ferkeln (Nielsen et al., 2013) auf 18 – 20 Ferkel zu steigern (Oliviero et al., 2019). Nach Knox (2025) soll dieser Trend weiter bestehen bleiben. Vorrangig sind dabei ökonomische Überlegungen.

Die mit dieser Entwicklung verbundenen Herausforderungen sind enorm und betreffen sowohl den Problemkreis des Tierwohls als auch den der undifferenzierten Managementverfahren. Aus obstetrischer und neonatologischer Sicht müssen einige mit dieser reproduktiven Leistungssteigerung verbundenen Faktoren kritisch hinterfragt werden.

Von der maternalen Seite her betrifft das vor allem das Thema nach der Grenze der Uteruskapazität. Die einseitige Nutzung des ovariell-reproduktiven Potenzials hinsichtlich einer gesteigerten Zahl ovulationsbereiter Follikel und befruchtungsfähiger Oozyten stellt nur eine Seite des Gestations-Gesamtkomplexes dar. Die andere betrifft die Uteruskapazität sowie die Entwicklungsperspektiven für die Embryonen respektive Feten. Gemeint damit ist, den in der Überzahl vorhandenen befruchteten Eizellen auch genügend Raum und Plazentationsfläche für deren Weiterentwicklung zu bieten. Hier besteht unter den momentanen Gegebenheiten eine Inkongruenz zwischen erhöhter Ovulationsrate und Uteruskapazität. Dies führt zu bestimmten Problemen wie embryonalem Tod, reduzierten Plazentationsflächen und -gewichten mit der Folge einer reduzierten fetalen Wachstumstendenz (Vernunft et al., 2018; Blim, 2020; König et al., 2021). Dazu kommen die Fälle des Absterbens der Fruchtanlage in fetalen Stadien mit Mumifikation. Die intrauterine embryonale und fetale Entwicklung ist ausführlich im Übersichtsartikel von Almeida and Dias (2022) dargestellt.

Eine andere Frage betrifft die des Überlastungssyndroms des maternalen Organismus durch die teilweise abnorme Ferkelzahl im Zusammenhang mit einer raschen Abfolge wiederholter Gestationen. Nach der den maternalen Organismus belastenden Trias – Gestation, Partus, Laktation – besteht unter heutigen Verhältnissen kaum eine ausreichende biologische postlaktionelle Rastzeit, in der die Möglichkeit einer maternal körperlichen Regeneration gegeben wäre. Vielmehr werden Zuchttiere bereits kurz nach dem Absetzen der Ferkel erneut in den Reproduktionszyklus genommen. Insgesamt durchlaufen sie so 2,31 Gestationen pro Jahr (Deblitz and Efken, 2024).

Aus neonatologischer Sicht wären folgende kritische Punkte aufzuführen. Sie betreffen zum einen die pränatalen, intrapartalen und postnatalen Verluste. Hierunter fallen die embryonalen Todesfälle, die mumifizierten Feten, die Totgeburten sowie die Todesfälle der unmittelbar (bis

24 h p.n.) *post natum* versterbenden Neonaten und die sich summierenden Verluste bis zum Absetzalter. Die Angaben für Mumifikationen bei hochproliferativen Schweinen schwanken in der Literatur in Abhängigkeit von der Parität zwischen 3,41 % und 11,52 % (Blim, 2020; Schoos et al., 2023; Adi et al., 2024). Die Totgeburtenrate liegt bei 6,3 – 15,4 % (Blim, 2020; Schoos et al., 2023; Adi et al., 2024). Als postnatale Gesamtverluste werden unter der Berücksichtigung der Haltungsform (Kastenstand, Bewegungsbucht, Gruppenhaltung) Bereiche von 9,7 % bis 17,0 % (Kastenstand), von 18,1 % bis 26,8 % (Bewegungsbucht) und von 17,2 % bis 19,9 % (Gruppenhaltung) angegeben (Hales et al., 2014; Nicolaisen et al., 2019; Blim, 2020; Dumniem et al., 2023).

Ein gravierendes Problem unter neonatologischen Gesichtspunkten stellt bei hyperproliferativen Sauen die Geburtsgewichtsheterogenität dar. Literaturangaben zufolge schwankt der Anteil an Neonaten mit einem Geburtsgewicht von <1000 g in übergroßen Würfen zwischen 16,2 % und 18,6 % (Dumniem et al., 2023; Adi et al., 2024). Dies steht in unmittelbarem Zusammenhang zum Plazentagewicht, welches in Korrelation zur Wurfgröße signifikant abnimmt (Blim, 2020). Diese hypotrophen Neonaten haben schlechtere Überlebenschancen als die eu- oder hypertrophen (Baxter et al., 2008; Pedersen et al., 2011; Blim, 2020; Ward et al., 2020).

Die noch nicht genügend geklärte Frage ist, ob es sich bei den hypotrophen Ferkeln nur um ein reines Defizit der Körpermasse handelt oder ob bei ihnen eine umfassendere Problematik mit Abweichung im metabolischen und endokrinen System zum Zeitpunkt der Geburt infolge reduzierter Plazentationsfläche oder eingeschränkter Transformationsleistungen besteht. In diesem Zusammenhang wäre zusätzlich von Interesse zu eruieren, ob physiologische Unterschiede zwischen suidalen Neonaten alter Rassen und solchen aus modernen Kreuzungen gegeben sind.

Erweiterte Untersuchungen über die Physiologie und Pathophysiologie bei Nachkommen einer alten Rasse gegenüber einer solchen von hyperproliferativen Schweinen in Abhängigkeit vom Geburtsgewicht könnten deshalb Hinweise für weiterführende Überlegungen auf züchterischem Gebiet, aber auch für maternale Managementverfahren unter den derzeit bestehenden Verhältnissen geben.

2 Literaturübersicht

2.1 Intrinsische Herausforderungen der neonatalen Anpassung beim Schwein

Der porcine Neonat hat verschiedene Herausforderungen beim Übergang von der intrauterinen zur extrauterinen Umgebung zu bewältigen. Dies wurde in einem

Übersichtsartikel von Diehl et al. (2022) systematisch anhand der drei Phasen, in denen die neonatale Adaptation verläuft, veranschaulicht (Abbildung 1).

Unmittelbar nach der Geburt muss das Herz-Kreislauf-System reguliert werden sowie die Lungen- und Atemfunktion einsetzen. Davon abhängig ist die Stabilisierung des intracorporalen Säure-Basen-Haushaltes. Außerdem erfährt der Neonat einen massiven Temperatursturz von bis zu 3,5 °C innerhalb 30 min *post natum* (Vande Pol et al., 2020b). Dieser wird bedingt durch die Temperaturdifferenz zwischen intra- und extrauteriner Umwelt sowie durch die Trocknungsvorgänge auf der Haut. Dieser Temperatursturz dient einerseits dazu, die cerebral generierte Atemfunktion in Gang zu setzen (Walser and Bostedt, 2008). Durch die Abtrocknungsvorgänge gehen aber andererseits auch wichtige Energiereserven verloren. Die körpereigene Thermoregulation setzt während des ersten Lebenstages ein. Dazu kommen energieverbrauchende Prozesse in den ersten Lebensminuten und -stunden wie die Aufnahme der Bewegungsaktivität, die Suche nach dem Mammarkomplex sowie durch die primären Saugakte. Dieser Ablauf dient der sofortigen Energieaufnahme über das Kolostrum, weil die endogenen Energiereserven unmittelbar *post natum* relativ schnell verbraucht sind (Herpin et al., 2002; Le Dividich et al., 2005; Theil et al., 2011; Blavi et al., 2021). Aus all dem folgt, dass unmittelbar *post natum* nahezu 24 h eine labile Temperatur-Situation besteht, weil diese Defizite nicht sofort durch eine ausreichende körpereigene Temperaturregulierung ausgeglichen werden können. Weiterhin ist zur Stabilisierung des Immunsystems der neugeborenen Ferkel die intestinale Passage von Immunkomponenten aus dem Kolostrum, wie beispielsweise maternalen Antikörper, Leukozyten und Zytokinen, für den Erwerb einer passiven Immunität essentiell (Weström et al., 2020; Forner et al., 2021).

Während der zweiten Phase der neonatalen Adaptation kommt es zur weiteren Organreife (bis etwa 14 d *post natum*). In der dritten Phase entwickeln sich neuronale, immunologische und muskuläre Eigenschaften (bis etwa 28 d *post natum*). Das erfolgreiche Absolvieren dieser Adaptionsvorgänge ist unmittelbar für das Überleben, aber auch für die später zu erbringenden Leistungen der Tiere entscheidend.

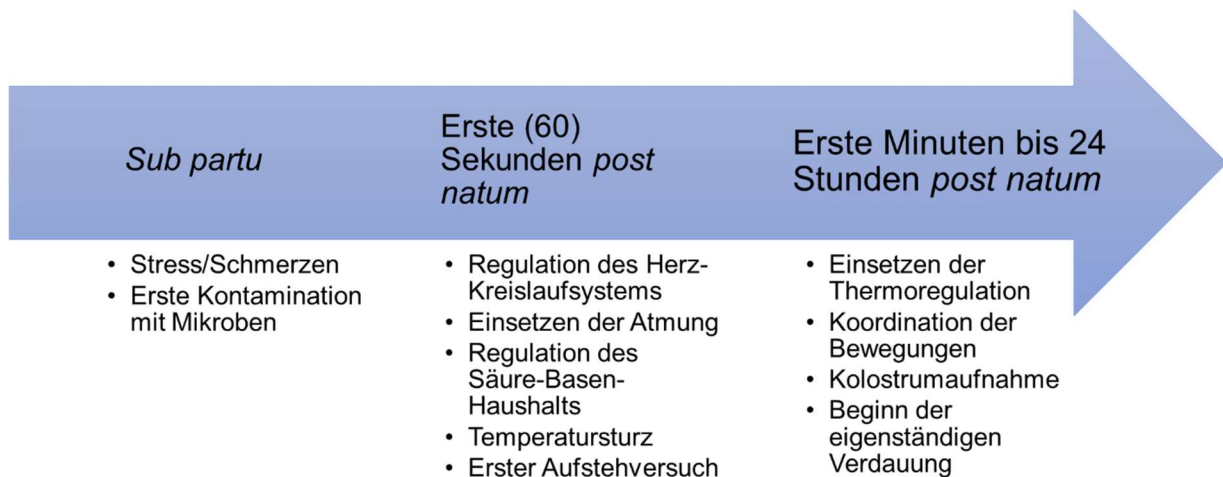


Abbildung 1: Herausforderungen in der früh-postnatalen Adaptationsperiode in Anlehnung an den Übersichtsartikel von Diehl et al. (2022).

2.2 Allgemeine Angaben über die verschiedenen Einflussfaktoren auf die Ferkelvitalität unmittelbar *post natum*

Für das postnatale Überleben müssen Neonaten je nach Spezies über eine ausreichende Organreife und Vitalität verfügen. Diese prinzipielle Aussage wird für suidale Neonaten durch verschiedene Studien bestätigt. Ferkel mit einer gesicherten Vitalität unmittelbar *post natum* haben bessere Überlebenschancen (Baxter et al., 2008; Uddin et al., 2022). Dabei wird die Vitalität von verschiedenen intrinsischen und extrinsischen Faktoren beeinflusst (Abbildung 2). Ein wichtiger Faktor stellt in diesem Kontext das Geburtsgewicht dar (Baxter et al., 2008; Pedersen et al., 2011; Blim, 2020; Schoos et al., 2023; Mbuthia et al., 2025). Neben dessen Bestimmung können sowohl der Body-Maß-Index (BMI) (Baxter et al.; Rootwelt et al., 2013) als auch der Ponderal-Index (PI) (Baxter et al., 2008; Baxter et al., 2009; Hales et al., 2013) zur Einschätzung der Vitalfunktionen der Ferkel herangezogen werden.

Neben der intrauterinen Wachstumsintensität und den damit erlangten Lebensvoraussetzungen sind auch Geburtsverlauf (Uddin et al., 2022; Walls et al., 2022) und Geburtsreihenfolge (Baxter et al., 2008; Uddin et al., 2022) von wichtiger Bedeutung für das Überleben der Ferkel. Die Auswirkungen des Geburtsverlaufes auf die Ferkel wurden von Walls et al. (2022) in einem Übersichtsartikel ausführlich dargestellt. So steigt das Risiko von Totgeburten mit dem Auftreten von Geburtsstörungen verschiedener Genese (Blim, 2020; Nam and Sukon, 2022). Insgesamt werden unabhängig vom Auftreten von Geburtsstörungen 5,3 % – 11,7 % der Ferkel totgeboren (Tospitakkul et al., 2019; Blim, 2020; Nam and Sukon, 2022; Adi et al., 2024). Aber auch das Risiko der Ferkel, während der ersten 24 Stunden p.n. zu versterben, steigt mit zunehmendem kumulativen Geburtsintervall (Schoos et al., 2023).

Auch die Haltungssysteme, in welches die Ferkel geboren werden, sowie das mütterliche Verhalten wirken sich auf die Überlebenschancen aus. Beim direkten Vergleich verschiedener Abferkelsysteme werden höhere Saugferkelverluste in der Bewegungsbucht (13,7 % – 26,8 %) im Vergleich zur Haltung im Kastenstand (11,8 % – 17,0 %) verzeichnet (Hales et al., 2014; Nicolaisen et al., 2019; Dumniem et al., 2023). Dabei waren die Anteile erdrückter Ferkel in freien Abferkelsystemen (Bewegungsbucht: 70,8 %, Gruppenhaltung: 70,4 %) höher als wenn die Sau im Kastenstand fixiert war (36,1 %) (Nicolaisen et al., 2019). In einigen anderen Untersuchungen hingegen wurden keine Unterschiede bezüglich der neonatalen Überlebensrate zwischen den verschiedenen Haltungssystemen gefunden (Pedersen et al., 2011; Höbel, 2019).

Die meisten neonatalen Verluste sind während der früh-postnatalen Adaptation zu verzeichnen (Baxter et al., 2008; Devillers et al., 2011; Kilbride et al., 2012; Diehl et al., 2022; Gladbach, 2022). Dabei konnte Gladbach (2022) keinen Unterschied zwischen der Deutschen Landrasse und dem Deutschen Sattelschwein feststellen.

Um die Vitalität der Ferkel unmittelbar *post natum* zu bewerten, wurden verschiedene Scoring-Systeme entwickelt, die entweder der Einschätzung des ganzen Wurfes dienen (Schodl et al., 2019), oder sich auf ein Einzeltier beziehen (Zaleski and Hacker, 1993; Ao et al., 2021).

Nachfolgend sollen die Einflussfaktoren Rasse, Haltungssystem, Geburtseinleitung und Geburtsgewicht näher dargestellt werden.

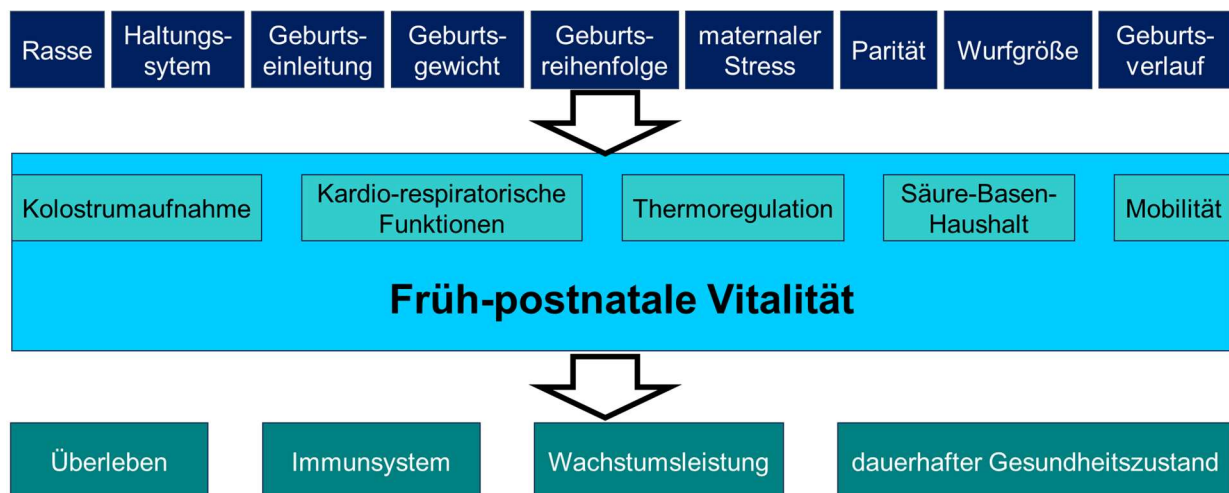


Abbildung 2: Intrinsische und extrinsische Einflussfaktoren auf die früh-postnatale Vitalität und die Bedeutung für das individuelle Ferkel.

2.3 Einfluss von Genetik auf Geburtsverlauf und Aufzuchtleistung

Die Wurfgröße ist von der Genetik abhängig (Leenhouwers and Merks, 2013; Knecht et al., 2015; Gladbach, 2022; Oster et al., 2025). So hat beispielsweise das Deutsche Sattelschwein, als Vertreter einer autochthonen Rasse, eine mittlere Wurfgröße von 11,1 – 12,8 insgesamt

geborenen Ferkeln (König et al., 2021; Gladbach, 2022), die Deutsche Landrasse dagegen eine solche von 14,7 – 15,1 (Vernunft et al., 2018; Gladbach, 2022) und die Kreuzung zwischen Deutscher Landrasse x Large White-Schweinen (dbViktoria® des BHZP) eine solche von sogar 17,7 (Lehn et al., 2025).

Auch die Geburtsgewichte werden unter anderem von der Rasse mitbestimmt (Lee and Haley, 1995; Quesnel et al., 2008; Knecht et al., 2015). Meishan-Ferkel haben mit Mittelwerten von 850 – 932 g (Le Dividich et al., 1991; Dong et al., 2021) ein geringeres Geburtsgewicht als Ferkel des Deutschen Sattelschweins oder der Deutschen Landrasse. Ihr mittleres Geburtsgewicht beträgt 1343 – 1420 g (Kuhn et al., 2001; König et al., 2021; Gladbach, 2022) bzw. 1340 – 1400 g (Kuhn et al., 2001; Vernunft et al., 2018; Gladbach, 2022). Aber noch andere Parameter beeinflussen die fetale Wachstumskapazität. Vor allem bei großen Würfen wäre als Faktor die Uteruskapazität und damit die für jeden fetalen Komplex zur Verfügung stehende Plazentationsfläche zu benennen (Vernunft et al., 2018). Neben der Plazentationsfläche kommt aber auch der metabolischen Effizienz der Plazenta Bedeutung zu. Dies konnten König et al. (2021) in einem Vergleich von Dänischen Genetiken und Deutschen Sattelschweinen, jeweils in der Anpaarung mit Pietrain, darstellen. So sind demnach die Plazenten bei Dänischer Genetik zwar effizienter, allerdings korrelierten das Gewicht der Plazenten sowie die Plazentationsfläche positiv mit dem Geburtsgewicht der Ferkel.

Die Geburtsdauer unterschied sich weder zwischen verschiedenen genetischen Linien von French Large White, noch zwischen verschiedenen Rassen, wie der Deutschen Landrasse und dem Deutschen Sattelschwein (Canario et al., 2009; Oster et al., 2025). Aber bei einer größeren Zahl gesamt geborener Ferkel verlängert sich entsprechend auch die Geburtsdauer (Morgenthum and Bolduan, 1988; Van Rens et al., 2005; Oliviero et al., 2019; Blim, 2020). Längere Geburten gehen sowohl mit mehr totgeborenen Ferkeln (Langendijk and Plush, 2019; Blim, 2020), als auch mit mehr hypoxämischen Ferkeln einher (Langendijk and Plush, 2019). Im Verlauf der Säugeperiode werden unterschiedliche Verlustraten zwischen den einzelnen Rassen berichtet (Leenhouders and Merks, 2013). Auch mit zunehmender Wurfgröße steigen die Saugferkelverluste an (Nielsen et al., 2013; Nuntapaitoon and Tummaruk, 2018). Eine Ursache dafür ist das Missverhältnis zwischen der Anzahl lebendgeborener Ferkel und der Anzahl funktionsfähiger Zitzen bei großen Würfen (Rutherford et al., 2013; Lehn, 2020; Blavi et al., 2021). Für europäische Rassen werden durchschnittlich 12 – 14 funktionsfähige Zitzen beschrieben (Rutherford et al., 2013). Nach Schild et al. (2020) ist diese Zahl aber von der jeweiligen Rasse abhängig und unterliegt auch dort individuellen Schwankungen. Wenn die Zahl lebendgeborener Ferkel die Zahl funktionsfähiger Zitzen übersteigt, sind höhere Saugferkelverluste zu verzeichnen (Vasdal et al., 2011). Weitere Verlustursachen sind unter 2.4 dargestellt.

Züchterische Ansätze zur Reduktion der Ferkelverluste sind die Selektion auf gute Mütterlichkeit (Canario et al., 2014) und vitale Ferkel (Canario et al., 2014; Schodl et al., 2019), denn auch die Zahl abgesetzter Ferkel ist von der Rasse abhängig (Gokuldas et al., 2015; Knecht et al., 2015).

Weiter wird von höheren täglichen Zunahmen bei modernen Rassen als bei Robustrassen berichtet (Leenhouwers and Merks, 2013; Souphannavong and Sringarm, 2016). Aber auch die täglichen Zunahmen zwischen verschiedenen modernen Rassen unterscheiden sich (Do et al., 2013; Leenhouwers and Merks, 2013). Daher waren die Absetzgewichte zwischen Ferkeln verschiedener Rassen unterschiedlich (Knecht et al., 2015; Souphannavong and Sringarm, 2016; Dotché et al., 2020).

2.4 Einfluss der Haltungssysteme auf reproduktionsrelevante Parameter von Sau und Ferkel im peripartalen Zeitraum

Ein immer wieder in der Öffentlichkeit diskutierter Faktor ist die Fixierung der Sauen um den Geburtszeitraum im Kastenstand. Mit der siebten Änderung der Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung vom 29.01.2021 dürfen Sauen ab dem Jahr 2036 für maximal 5 Tage im peripartalen Zeitraum fixiert werden. Der Einsatz des Kastenstands wird mit höherer Arbeitssicherheit (Meyer-Hamme et al., 2017) und begrenzten Ferkelverlusten durch Erdrücken (Nicolaisen et al., 2019) begründet.

Für die Sauen sind negative Auswirkungen durch die Fixierung im peripartalen Zeitraum beschrieben (Pedersen et al., 2011; Blim, 2020; Blim et al., 2022; Gladbach, 2022). Die Tiere sind dabei in ihren natürlichen Verhaltensweisen wie dem Nestbau und der Lagerung *intra partum* stark eingeschränkt (Oliviero et al., 2008; Andersen et al., 2014; Lehn, 2020). Über die Einwirkung des Haltungssystems auf messbare Stress-Parameter liegen unterschiedliche Aussagen vor. So konnte bei Sauen, die im Kastenstand fixiert waren, *ante partum* eine höhere Herzfrequenz festgestellt werden als bei Sauen in der Bewegungsbucht (Oster et al., 2025). Einerseits ist beschrieben, dass das Fixieren zu Stress führt, der sich in Stereotypien (Lehn, 2020; Zhang et al., 2020) und höheren Cortisol-Konzentrationen bei Sauen im Kastenstand widerspiegelt (Jarvis et al., 2001; Amdi et al., 2016). In neueren Untersuchungen konnte andererseits kein Unterschied in den Cortisol-Konzentrationen von Sauen, die im Kastenstand oder einer Bewegungsbucht abferkelten, gefunden werden (Lehn, 2020; Goumon et al., 2022; Oster et al., 2025). Oster et al. (2025) konnten ebenso keine systematischen Unterschiede zwischen einer Haltung im Kastenstand und in der Bewegungsbucht in den Adrenalin- und Noradrenalin-Konzentrationen *ante partum*, *intra partum* und *post partum* feststellen.

Ein alternatives Haltungssystem sind Buchten, in denen sich die Sau frei bewegen kann. Damit sollen die Bedürfnisse der Sauen, wie das Nestbauverhalten *ante partum* und im Stadium I

der Geburt, besser befriedigt werden (Andersen et al., 2014; Lehn, 2020). Aber auch das Säugeverhalten ähnelt in freien Abferkelsystemen mehr dem in seminaturaler Haltung (Wiechers et al., 2022). Weiter wirkte sich die Bewegungsbucht positiv auf den Geburtsverlauf aus (Sánchez-Salcedo and Yáñez-Pizaña, 2024). Während eine Zahl von Veröffentlichungen geringere Zwischenferkelintervalle in der Bewegungsbucht beschrieben (Oliviero et al., 2010; Pedersen, 2018), konnte in anderen Untersuchungen diesbezüglich kein Unterschied festgestellt werden (Pedersen et al., 2011; Dumniem et al., 2023). Unterschiede in den Oxytocin-Konzentrationen in Abhängigkeit vom Haltungssystem konnten im Stadium II der Geburt nicht gefunden werden (Gladbach, 2022; Lehn et al., 2025). Das ist deshalb für die Ferkel von Bedeutung, da längere Zwischenferkelintervalle mit einem geringeren Sauerstoffpartialdruck im Blut der Ferkel einhergehen (Islas-Fabila et al., 2018).

In einigen Untersuchungen wurde von weniger totgeborenen Ferkeln in der Bewegungsbucht berichtet (Oliviero et al., 2010; Glencorse et al., 2019; Nowland et al., 2019), in anderen Studien konnte kein Unterschied im Anteil totgeborener Ferkel gefunden werden (Pedersen et al., 2011; Kilbride et al., 2012; Dumniem et al., 2023).

Für die Ferkel selbst sind im Hinblick auf das Haltungssystem meist die Saugferkelverluste mit unterschiedlichen Ergebnissen dargelegt. Einerseits werden höhere Verluste in freien Abferkelsystemen (13,7 % – 26,8 %) im direkten Vergleich zur Haltung im Kastenstand (9,7 % – 17,0 %) verzeichnet (Hales et al., 2014; Nicolaisen et al., 2019; Blim, 2020; Dumniem et al., 2023), in anderen Studien wurden keine Unterschiede in den Saugferkelverlusten gefunden (Pedersen et al., 2011; Höbel, 2019).

Allgemein werden als Hauptursachen für die Ferkelverluste Erdrücken und Inanition gesehen (Kielland et al., 2018; Nicolaisen et al., 2019). Pedersen et al. (2011) hingegen konnten keine Unterschiede in den Verlustursachen wie Erdrücken oder Inanition im Bezug zum Haltungssystem feststellen, lediglich bei nicht näher definierten „Krankheiten“ traten Unterschiede zwischen den Haltungsformen auf. Eine Fixierung der Sau über den dritten Tag post partum hinaus wirkte sich nicht mehr positiv auf die Ferkelverluste aus (Nicolaisen et al., 2019; Heidinger et al., 2022).

Interessant ist, dass Dumniem et al. (2023) eine höhere Kolostrumaufnahme bei Ferkeln in der Bewegungsbucht verzeichnen konnten. Die Kolostrumaufnahme stellt einen entscheidenden Faktor für die Ferkelvitalität und Überlebenschancen dar (Devillers et al., 2011). Ebenso ist die Milchmenge, die von den Ferkeln während einer Säugeperiode von drei Wochen aufgenommen wurde, in der Bewegungsbucht größer als wenn die Sau im Kastenstand fixiert war (Dumniem et al., 2025). Das lässt Auswirkungen auf die Physiologie der Ferkel vermuten.

Ein möglicher Ansatz, die Ferkelverluste möglichst gering zu halten, ist die Ausgestaltung der Buchten, damit den Ferkeln Fluchtmöglichkeiten beim Ablegevorgang der Sau geboten

werden (Nicolaisen et al., 2019). Ferkel nutzten auch bevorzugt ein helles, warmes Ferkelnest, wodurch das Risiko des Erdrückens möglicherweise minimiert werden kann (Morello et al., 2019). Zusätzlich sollte für die einzelne Sau das Haltungssystem über die verschiedenen Laktationen hinweg gleichbleiben, da die Sauen ihre Verhaltensweisen während der ersten Parität der Haltungsumgebung anpassen (King et al., 2019).

2.5 Auswirkungen der Geburtseinleitung auf den Geburtsverlauf und die Neonaten

Die Ferkelvitalität unmittelbar *post natum* wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Ein wesentlicher ist jedoch der Einfluss des Geburtsverlaufes auf diesen lebenswichtigen Zustand (Uddin et al., 2022). Die Geburtsdauer korreliert dabei positiv mit der Wurfgröße (Adi et al., 2022; Jahn et al., 2022). Festgestellt werden konnte zudem, dass sich längere Geburten nicht nur negativ auf die Vitalität auswirken (Mainau et al., 2010; Adi et al., 2022; Schoos et al., 2023), sondern auch mit erhöhter Totgeburtenrate der später im Geburtsverlauf geborenen Ferkeln einhergeht (Uddin et al., 2022). In der Geburtsreihenfolge später geborene Ferkel werden häufiger zyanotisch geboren (Langendijk and Plush, 2019). Das hat dann auch Auswirkungen auf die Zeit bis zur ersten Kolostrumaufnahme und die Gewichtszunahme bis zur zehnten Lebenswoche (Langendijk and Plush, 2019), vor allem aber auf das postnatale Überleben (Panzardi et al., 2013).

In konventioneller Schweinehaltung werden die Geburten teilweise hormonell induziert. Ziel dieser biotechnischen Maßnahme ist, die Geburten während der normalen Arbeitszeit stattfinden zu lassen, um eine bessere Geburtsüberwachung zu gewährleisten (Nguyen et al., 2011; Kirkden et al., 2013; Decaluwé et al., 2014a). Allerdings werden so unter Umständen biologische Faktoren und Tierwohlbelange den wirtschaftlichen Interessen untergeordnet.

Physiologisch sinkt die Progesteron-Konzentration zwischen dem 112. und 114. Gestationstag (Lehn, 2020). Die Geburt selbst wird durch höhere fetale Cortisol-Konzentrationen ausgelöst (Van Dijk et al., 2005). Durch die Gabe von Prostaglandin $F_{2\alpha}$ ($PGF_{2\alpha}$) oder dessen Analoga in dieser Zeit wird eine vorzeitige, aber synchronisierte Luteolyse bewirkt (Kirkden et al., 2013; Ziecik et al., 2018; Monteiro et al., 2022). Unberücksichtigt bleibt dabei die nicht unerhebliche Varianz der biologischen Gestationsdauer. Diese ist geprägt von der Abhängigkeit genetischer Faktoren und der Wurfgröße. Es werden mittlere Gestationslängen von 114,6 – 118,4 Tagen angegeben (Blim, 2020; Nowak et al., 2020; Gladbach, 2022; Oster et al., 2025).

Prostaglandin wird in der Regel ein bis zwei Tage vor dem errechneten, mittlerem Abferkeltermin verabreicht (Decaluwé et al., 2012; Kirkden et al., 2013; Monteiro et al., 2022; Nam and Sukon, 2022). Etwa 24 Stunden nach der Prostaglandin-Applikation werden die Wehen durch die Injektion von Oxytocin bzw. dessen Analoga initiiert (Boonraungrod et al.,

2018; Mills et al., 2021). Dabei stimuliert Carbetocin die Wehen weniger stark, aber über einen längeren Zeitraum als Oxytocin (Ward et al., 2019).

In einigen Studien wurden weder die Geburtslänge noch die Zwischenferkelintervalle durch die hormonelle Geburtseinleitung beeinflusst (Decaluwé et al., 2014a; Boonraungrod et al., 2018). Andere Studien berichten von einer reduzierten Geburtsdauer gegenüber Kontrolltieren durch den Einsatz von Oxytocin oder Carbetocin (Ward et al., 2019; Zaremba et al., 2019; Hill et al., 2022) und geringeren Zwischenferkelintervallen (Hill et al., 2022). Bei der doppelten Applikation von PGF_{2α} im Abstand von sechs Stunden wurde auch ein geringerer Anteil an geburtshilflichen Interventionen beobachtet als bei einmaliger PGF_{2α}-Gabe und spontanen, nicht-induzierten Geburten (Tospitakkul et al., 2019). Allerdings wurde ein höheres Dystokie-Risiko beschrieben, wenn Oxytocin verwendet wurde (Boonraungrod et al., 2018). Auch von mehr totgeborenen Ferkeln wurde nach Oxytocin-Gabe berichtet (Mota-Rojas et al., 2005; Muro et al., 2021; Hill et al., 2022). In anderen Studien konnte dieser Effekt aber nicht gefunden werden (Decaluwé et al., 2014a; King et al., 2019; Mills et al., 2021). Nach alleiniger Applikation von Prostaglandinen kam es zu keiner Verringerung der Totgeburtenrate im Vergleich zu Geburten ohne hormonelle Induktion (Boonraungrod et al., 2018; Tospitakkul et al., 2019; Nam et al., 2022).

Für die Ferkel ist die Geburtseinleitung zu einem festgelegten Termin insofern von Bedeutung, weil in den letzten Gestationstagen neben einer progressiven Körpermassenzunahme wichtige fetale Reife-Prozesse stattfinden, wie z.B. die Surfactant-Bildung in der Lunge (Walser and Bostedt, 2008). Durch diesen Faktor wird der postnatale Gasaustausch in der Lunge ermöglicht. Da dieser Prozess der Surfactant-Synthese streng an den fetalen Reifezustand gekoppelt ist, kann es sein, dass die Geburtsterminierung auf die durchschnittliche Gestationsdauer des Bestandes Feten betreffen kann, die sich noch in prämaturen Stadien befinden und somit mit einer ungenügenden Surfactant-Ausstattung in das postuterine Stadium kommen. Die Folge wäre, dass bei diesen Neonaten Störungen in der Kompensation der neonatalen Azidose auftreten können. Diese entsteht durch Beeinträchtigungen im Gasaustausch durch die Uteruskontraktionen und die damit verbundene temporäre Unterbrechung der plazentalen Blutzufuhr (Walser and Bostedt, 2008). Wehrend et al. (2005) konnten aber keine Unterschiede in der Kompensation der neonatalen Azidose zwischen Ferkeln aus spontanen oder mit Cloprostenol und Oxytocin bzw. Carbetocin eingeleiteten Geburten feststellen. Eine sehr frühe Geburtseinleitung kann darüber hinaus auch ein geringeres Geburtsgewicht bewirken (Olson et al., 2009; Taechamaeteekul et al., 2022).

Durch den Einsatz von Carbetocin kommt es auch zur Reduktion der Kolostrummenge (Boonraungrod et al., 2018; Jiarpinitnun et al., 2019). Weiterhin wurden bei Ferkeln aus induzierten Geburten geringere Rektaltemperaturen 24 Stunden nach der Geburt gemessen

(Boonraungrod et al., 2018). Auch wenn diese für die Ferkelvitalität wichtigen Merkmale offenbar bestehen, wirkte sich die Geburtseinleitung nach Vallet and Miles (2017) nicht auf die Saugferkelverluste aus. Sie beschrieben Saugferkelverluste in Abhängigkeit von der Parität zwischen 13 % und 21 % nach induzierten Geburten (Cloprostenol an Gestationstag 114) und zwischen 14 % und 18 % nach biologisch-beendeten Geburten beziehungsweise nach Cloprostenol an Tag 116, sofern es nötig war. Teilweise wurde sogar eine geringere neonatale Mortalität nach hormoneller Geburtseinleitung beschrieben, die auf eine bessere Geburtsüberwachung in diesem Kontext zurückgeführt wurde (Nguyen et al., 2011; Kirkden et al., 2013).

2.6 Relevanz des Geburtsgewichts für das postnatale Überleben

Große Würfe moderner Rassen gehen mit geringeren durchschnittlichen Ferkelgewichten einher (Vernunft et al., 2018; Blim, 2020; König et al., 2021) und der Anteil an Ferkeln mit einem Geburtsgewicht von <1000 g steigt (Quesnel et al., 2008; Dumniem et al., 2023; Knap et al., 2023; Adi et al., 2024). Die Heritabilität des Geburtsgewichts wird mit 0,13 – 0,19 angegeben (Kapell et al., 2011). Aber auch Einflüsse der Parität der Sau sind beschrieben (Carney-Hinkle et al., 2013; Muns et al., 2016; Laothong et al., 2024). Es besteht eine positive Korrelation zwischen dem Geburtsgewicht des Ferkels und dem Gewicht der Plazenta sowie der Plazentaoberfläche (Vernunft et al., 2018; König et al., 2021). Jedoch bleibt nach König et al. (2021) die Plazentaeffizienz unabhängig im Geburtsgewicht konstant.

Ein geringeres Geburtsgewicht geht mit einer geringeren Vitalität direkt postnatal einher (Baxter et al., 2008; Blim, 2020; Lehn, 2020). Demzufolge verenden Ferkel mit einem geringeren Geburtsgewicht überproportional häufig sowohl während der ersten neonatalen Adaptationsperiode als auch über die gesamte Säugeperiode hinweg (Baxter et al., 2008; Devillers et al., 2011; Pedersen et al., 2011; Nuntapaitoon et al., 2018; Huting et al., 2019; Zeng et al., 2019; Blim, 2020; Schild et al., 2020; Schoos et al., 2023; Mbuthia et al., 2025). Für Ferkel mit einem Geburtsgewicht <1100 g werden die Saugferkelverluste mit 34,4 % angegeben, bei Ferkeln mit einem Gewicht von ≥ 1110 g sind es lediglich 8,2 % (Feldpausch et al., 2019).

Übereinstimmend in der Literatur ist, dass die meisten Verluste während der ersten Tage *post natum* zu verzeichnen sind (Baxter et al., 2008; Devillers et al., 2011; Kilbride et al., 2012; Diehl et al., 2022; Gladbach, 2022). Dabei wiesen die verstorbenen Ferkel unter anderem ein geringeres Geburtsgewicht als die Überlebenden auf (Baxter et al., 2008; Devillers et al., 2011). Nach Declerck et al. (2016) betrug die Mortalitätsrate bis zum 3. Lebenstag von Ferkeln mit einem Geburtsgewicht <1000 g 49 %, während sie bei Ferkeln mit einem Geburtsgewicht von 1000 – 1200 g lediglich bei 12 % lag.

Ferkel mit einem geringen Geburtsgewicht bewegen sich langsamer als Ferkel mit einem höheren Geburtsgewicht (Vanden Hole et al., 2018). Dementsprechend benötigen sie sowohl mehr Zeit bis zum ersten Gesäugekontakt (Baxter et al., 2008; Pedersen et al., 2011; Plush et al., 2018) als auch bis zum ersten Saugakt (Plush et al., 2018). Auch sind sie ihren schwereren Wurfgeschwistern in der Konkurrenz um die Zitzen unterlegen (Andersen et al., 2011; Uddin et al., 2022) und nehmen dadurch weniger Kolostrum auf (Schoos et al., 2023). Dies wirkt sich nicht nur negativ auf den Immunstatus aus, sondern hat besondere Bedeutung hinsichtlich der aktuellen Energieversorgung in den ersten Stunden *post natum* (Pedersen et al., 2011; Theil et al., 2014). Denn die Ausstattung mit endogenen Energiereserven ist bei neonatalen Ferkeln gering (Herpin et al., 2002; Le Dividich et al., 2005; Theil et al., 2011; Blavi et al., 2021). Bei hypotrophen Ferkeln liegen sogar weniger Energiereserven vor als bei schwereren Wurfgeschwistern (Herpin et al., 2002; Vanden Hole et al., 2019). In einer anderen Untersuchung konnten diese Differenzen in den Energiereserven in Abhängigkeit vom Geburtsgewicht allerdings nicht bestätigt werden (De Vos et al., 2015).

Ein besonderes Problem hinsichtlich der Kolostralversorgung der suidalen Neonaten besteht zudem bei hyperproliferativen Sauen. Die Kolostrummenge steigt nicht mit der Anzahl geborener Ferkel, sondern bleibt konstant. Somit steht bei zunehmender Wurfgröße dem einzelnen Ferkel nur eine geringere Kolostrummenge zur Verfügung (Devillers et al., 2007; Quesnel et al., 2012; Decaluwé et al., 2014b). Durch die geringere zur Verfügung stehende Kolostrummenge je Neonat bei hyperproliferativen Sauen ist die Ausstattung mit Immunglobulinen bei deren Nachkommen unterdurchschnittlich (Nguyen et al., 2013; Uddin et al., 2022). Weitere Beeinträchtigungen des Gesundheitsstatus der Ferkel sind durch puerperale Störungen wie das postpartale Dysgalaktie-Syndrom möglich (Reiner et al., 2009). Ein zusätzliches Problem besteht bei hypotrophen Ferkeln bezüglich der Thermoregulation in der ersten Adaptationsperiode. Durch das ungünstigere Oberflächen-Volumen-Verhältnis kühlen leichtgewichtig geborene Ferkel leichter aus (Herpin et al., 2002; Kammergaard et al., 2011). Ferkel mit einem geringeren Geburtsgewicht weisen daher 24 Stunden *post natum* geringere Rektaltemperaturen auf als Ferkel mit einem höheren Geburtsgewicht (Kammergaard et al., 2011; Vande Pol et al., 2020b).

Darüber hinaus sind hypotrophe Ferkel häufiger von intrauteriner Wachstumsreduktion/-restriktion (IUGR) betroffen (Amdi et al., 2016; Oliviero et al., 2019; König et al., 2021). Ursächlich ist dafür der intrauterine Platzmangel und im Kontext dazu eine geringere Plazentationsfläche (Chaiyapatmaetee et al., 2025). Diese Ferkel zeigen eine geringere Wachstumsleistung (Ekert Kabalin et al., 2017; Hawe et al., 2020; Stange et al., 2020), weshalb sie mehr Zeit bis zum Erreichen des Schlachtgewichtes benötigen (Vázquez-Gómez et al., 2018).

Verschiedene züchterische Ansätze zur Bewältigung des Problems hypotropher Ferkel wurden in einem Übersichtsartikel von Rutherford et al. (2013) dargestellt. Durch genetische Selektion und nutritive Ansätze während der Gestation, wie beispielsweise eine höhere Energiezufuhr, wird versucht, das individuelle Geburtsgewicht zu erhöhen (Rutherford et al., 2013; Che et al., 2017; Threadgold et al., 2021). Die bisher erzielten Erfolge sind jedoch unzureichend (Langendijk et al., 2023). Auch postnatal fehlt es nicht an Versuchen, über verschiedene Managementansätze das Überleben dieser untergewichtig geborenen Ferkel zu erhöhen (Tucker et al., 2021). Dazu zählen beispielsweise das Sortieren der Ferkel nach dem Gewicht beim Wurfausgleich (Vande Pol et al., 2021a), das getrennte Säugen der Ferkel an der Sau (engl. *split-suckling*) (Muns et al., 2015; Oliviero et al., 2019), aber auch das manuelle Abtrocknen direkt nach der Geburt sowie das Nutzen einer Wärmekiste (Vande Pol et al., 2021b), um Wärmeverluste durch das Verdunsten der Amnionflüssigkeit zu minimieren. Es zeigt sich aber, dass noch nicht ausreichende Kenntnisse über die physiopathologischen Gegebenheiten bei hypotrophen Ferkeln vorliegen, die es gestatten würden, auf die möglicherweise bei ihnen bestehenden Fehlfunktionen oder Defizite zu schließen und die Managementverfahren danach punktuell und nachhaltig auszurichten.

2.7 Charakteristika der Deutschen Landrasse und des Deutschen Sattelschweins

Bei den in diese Untersuchung inkludierten Rassen handelt es sich zum einen um die Deutsche Landrasse als einen Vertreter einer konventionellen Mutterlinie mit zunehmender reproduktiver Leistung und um das Deutsche Sattelschwein als traditionelle Robust-Rasse. Die beiden gewählten Rassen zeigen grundlegende Unterschiede hinsichtlich ihrer Reproduktionsmerkmale. Die Wurfgröße der Sattelschweine ist geringer als die moderner Genetiken. Gladbach (2022) konnte keine Unterschiede im Geburtsgewicht zwischen der Deutschen Landrasse und dem Deutschen Sattelschwein feststellen. In der Studie von König et al. (2021) hatten Sattelschwein-Ferkel ein höheres Geburtsgewicht als Ferkel dänischer Genetik; allerdings handelte es sich in der Studie von König et al. (2021) bei beiden genetischen Linien nicht um Reinzucht-Ferkel sondern um Kreuzungen mit Pietrain als Vatterrasse.

Die Graviditätsdauer Deutscher Sattelschweine ist durchschnittlich 1,2 Tage kürzer als die der Deutschen Landrasse (Oster et al., 2025). Hinzu kommt, dass sich die Muttertiere dieser beiden Rassen im peripartalen Zeitraum partiell sowohl endokrinologisch als auch metabolisch unterscheiden (Oster et al., 2025). So konnte Gladbach (2022) nur bei Tieren der Deutschen Landrasse in den ersten fünf Stunden *intra partum* mittlere Oxytocin-Konzentrationen von <35 pg/ml finden, während dies bei den Deutschen Sattelschweinen nicht der Fall war. *Intra partum*

waren bei den Deutschen Sattelschweinen höhere Noradrenalin-Konzentrationen zu messen als bei Tieren der Deutschen Landrasse (Gladbach, 2022; Oster et al., 2025).

3 Problemstellungen und Ziele

Der züchterische Erfolg bei der Tierart Schwein die reproduktive Potenz der Ovarfunktion zu nutzen, um die Wurfgröße nachhaltig zu steigern, darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass dies mit einer Reihe von Problemen auf obstetrischem und neonatologischem Gebiet verbunden ist. Diese betreffen zum einen das durchschnittliche individuelle Geburtsgewicht. Zusätzlich sind die Verluste in größeren Würfen höher. Dabei versterben die hypotrophen Neonaten überproportional häufig. Zum anderen ist aber auch das disproportionale Verhältnis zwischen der genetisch fixierten Sitzenzahl und der Zahl der Neonaten innerhalb des Verlustgeschehens von Bedeutung. Vor dem Hintergrund von Tierwohl und Tierschutz ist diese Entwicklung kritisch zu betrachten. Daher rücken Haltung und Management im peripartalen Zeitpunkt in den Fokus. Viele Untersuchungen beschäftigen sich mit den Auswirkungen verschiedener Haltungssysteme auf die Sau. Für die Ferkel werden meist jedoch lediglich die Verluste angegeben. Es gibt nur begrenzte Informationen über den Stoffwechsel neugeborener Ferkel, obwohl diese Daten für die Bewertung geeigneter Managementmaßnahmen unerlässlich sind. Ebenso verhält es sich mit Auswirkungen der Geburtsinduktion und der Rasse, speziell von Robustrassen, auf den Stoffwechsel der Ferkel. Aus der Literatur abgeleitet entstehen folgende Fragestellungen, wobei mit dieser investigativen Studie versucht werden soll, diese zu beantworten:

- Unterscheiden sich Neonaten der Rassen „Deutsche Landrasse“ und „Deutsches Sattelschwein“ im Stoffwechsel und der Organreife und folglich in ihrer Vitalität unmittelbar *post natum*?
- Werden die Organreifungsvorgänge der Ferkel durch die Verkürzung der Gestationsdauer durch die Geburtsinduktion an einem festgelegten Zeitpunkt unterbrochen oder können diesbezüglich keine negativen Folgen festgestellt werden?
- Beeinflussen verschiedene Haltungsbedingungen den Stoffwechsel und damit die Vitalität neonataler Ferkel?
- Bestehen bei porcinen Neonaten verschiedener Geburtsgewichtsklassen Differenzen im Metabolismus und Reifegrad und wirkt sich das auf deren Vitalität unmittelbar *post natum* aus?

4 Eigenanteil an der Untersuchung

Ich erkläre, folgende Teile im Wesentlichen zu der Untersuchung beigetragen zu haben:

- Organisation und Leitung der Probennahme
- Anleitung wissenschaftlicher Hilfskräfte
- Geburtsüberwachung und -leitung in Echtzeit sowie Aufnahme klinischer Daten unter der Geburt
- Aufnahme klinischer Daten und Probennahme bei Neonaten unmittelbar *post natum* und während der Säugeperiode
- Laboranalytik (Analyse metabolischer und endokrinologischer Parameter im Plasma) sowie Probenlogistik
- Deskriptive und statistische Datenauswertung
- Visualisierung der Daten durch geeignete graphische Methoden
- Manuskripterstellung; diese umfasste Vorbereitung, Erstellung und Aufbereitung der Publikation, besonders das Verfassen des ersten Entwurfs, dessen Überarbeitung vor dem Einreichen sowie entsprechend der Anmerkungen der Gutachter vor der Publikation.

5 Publikationen

5.1 Publikation 1

Influence of genotype and environment on piglet vitality and metabolic state during the suckling period of divergent birth weight classes

Heinke Lickfett, Michael Oster, Andreas Vernunft, Henry Reyer, Solvig Görs, Cornelia C. Metges, Hartwig Bostedt, Klaus Wimmers

Bibliographische Angaben:

Eingereicht: 14.07.2024

Akzeptiert: 04.02.2025

Bibliographie

ANIMAL, Volume 19, Heft 4, 101460 (2025); DOI: 10.1016/j.animal.2025.101460

© Elsevier Inc.

Beschreibung des Eigenanteils am Manuskript:

Studienplanung: Michael Oster, Andreas Vernunft, Hartwig Bostedt, Klaus Wimmers

Studiendurchführung: Heinke Lickfett, Michael Oster, Andreas Vernunft, Henry Reyer, Solvig Görs

Manuskripterstellung: Heinke Lickfett, Michael Oster, Henry Reyer

Revision des Manuskriptes: Heinke Lickfett, Michael Oster, Andreas Vernunft, Henry Reyer, Solvig Görs, Cornelia C. Metges, Hartwig Bostedt, Klaus Wimmers

Abstract:

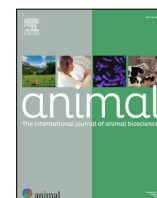
The high mortality rate of suckling piglets in commercial farms is a cause for concern and requires the adoption of innovative breeding and management approaches for effective mitigation. Piglets are particularly vulnerable during the first days of life, which concerns especially neonates with a low birth weight. In this study, neonatal adaptation was analysed regarding genotype and housing conditions following hormonally induced farrowing. A total of 96 piglets from 27 farrowings of German Landrace (GL; birth induction at day 115 of gestation) and German Saddleback sows (GS; birth induction at day 112 of gestation), kept either in crates (1.0 square metre) or pens (6.5 square metre) were studied. The piglets were assigned to birth weight categories (hypotrophic: 800–1 100 g; eutrophic: >1 100–1 500 g; hypertrophic: >1 500 g) and examined via repeated blood analyses on the following time period: 0–6 h, day 1, day 4, day 20 *postnatum*, and one-day postweaning. Analysed plasma metabolites included

albumin, ammonia, chloride, cortisol, creatinine, fructose, glucose, haptoglobin, inositol, insulin, lactate, non-esterified fatty acids, sodium, total protein, triglycerides, triiodothyronine, urea, and uric acid. Eutrophic and hypertrophic piglets were grouped as controls due to metabolic similarities ($P = 0.272$), whereas hypotrophic piglets could be discriminated from heavier littermates ($P = 0.025$). The GS piglets appeared to have higher tissue maturity compared to GL piglets, as indicated by improved clearance of plasma ammonia and creatinine levels. This suggests that inducing birth in GS sows at gestation day 112 corresponds to the physiological gestation length of this breed. The housing environment during farrowing influenced plasma glucose and inositol levels during the neonatal adaptation period, which might be attributed to differences in physical activity in farrowing pens compared to crates. Results suggest a higher risk for hypotrophic neonates to exhibit a hypoglycaemia-hypothermia complex at birth, which can have significant implications for neonatal health and development but might be mitigated by the observed increased release of cortisol. These findings highlight that piglet vitality and plasma metabolite dynamics during the suckling period are shaped by genetic background, housing conditions, and birth weight, reflecting differences in tissue maturity, physical activity, and energy reserves.



Animal

The international journal of animal biosciences



Influence of genotype and environment on piglet vitality and metabolic state during the suckling period of divergent birth weight classes



H. Lickfett^{a,b}, M. Oster^a, A. Vernunft^a, H. Reyer^a, S. Görs^a, C.C. Metges^a, H. Bostedt^b, K. Wimmers^{a,c,*}

^a Research Institute for Farm Animal Biology (FBN), Wilhelm-Stahl-Allee 2, 18196 Dummerstorf, Germany

^b Veterinary Clinic for Reproductive Medicine and Neonatology, Justus-Liebig-University Frankfurter Straße 106, 35392 Gießen, Germany

^c Chair of Animal Breeding and Genetics, Faculty of Agricultural and Environmental Sciences, University Rostock, Justus-von-Liebig-Weg 7, 18059 Rostock, Germany

ARTICLE INFO

Article history:

Received 14 July 2024

Revised 4 February 2025

Accepted 4 February 2025

Available online 10 February 2025

Keywords:

Early life

Farrowing

Neonate

Piglet survival

Traditional breeds

ABSTRACT

The high mortality rate of suckling piglets in commercial farms is a cause for concern and requires the adoption of innovative breeding and management approaches for effective mitigation. Piglets are particularly vulnerable during the first days of life, which concerns especially neonates with a low birth weight. In this study, neonatal adaptation was analysed regarding genotype and housing conditions following hormonally induced farrowing. A total of 96 piglets from 27 farrowings of German Landrace (GL; birth induction at day 115 of gestation) and German Saddleback sows (GS; birth induction at day 112 of gestation), kept either in crates (1.0 square metre) or pens (6.5 square metre) were studied. The piglets were assigned to birth weight categories (hypotrophic: 800–1 100 g; eutrophic: > 1 100–1 500 g; hypertrophic: > 1 500 g) and examined via repeated blood analyses on the following time period: 0–6 h, day 1, day 4, day 20 *postnatum*, and one-day *postweaning*. Analysed plasma metabolites included albumin, ammonia, chloride, cortisol, creatinine, fructose, glucose, haptoglobin, inositol, insulin, lactate, non-esterified fatty acids, sodium, total protein, triglycerides, triiodothyronine, urea, and uric acid. Eutrophic and hypertrophic piglets were grouped as controls due to metabolic similarities ($P = 0.272$), whereas hypotrophic piglets could be discriminated from heavier littermates ($P = 0.025$). The GS piglets appeared to have higher tissue maturity compared to GL piglets, as indicated by improved clearance of plasma ammonia and creatinine levels. This suggests that inducing birth in GS sows at gestation day 112 corresponds to the physiological gestation length of this breed. The housing environment during farrowing influenced plasma glucose and inositol levels during the neonatal adaptation period, which might be attributed to differences in physical activity in farrowing pens compared to crates. Results suggest a higher risk for hypotrophic neonates to exhibit a hypoglycaemia-hypothermia complex at birth, which can have significant implications for neonatal health and development but might be mitigated by the observed increased release of cortisol. These findings highlight that piglet vitality and plasma metabolite dynamics during the suckling period are shaped by genetic background, housing conditions, and birth weight, reflecting differences in tissue maturity, physical activity, and energy reserves.

© 2025 Research Institute for Farm Animal Biology (FBN). Published by Elsevier B.V. on behalf of The animal Consortium. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Implications

Farrowing and neonatal adaptation periods are crucial moments in life and are influenced by various factors, e.g. genotype and environment. Piglets of a traditional and a conventional breed were born from sows in crates or pens. Repeated blood samples were taken from these piglets over the suckling period. A higher organ maturity was found in German Saddleback neonates, as well as an influence of the housing system on carbohydrate metabolism,

implying higher physical activity in pens. Hypotrophic piglets seem to be more susceptible to a hypoglycaemia-hypothermia complex immediately after birth, which can affect the health and development of the neonate.

Introduction

Lower average birth weights are associated with large litters, which are common in modern pig breeds in conventional farming (Baxter et al., 2008; König et al., 2021). Low birth weight piglets, often defined as piglets with a birth weight less than 1 000 g (Quesnel et al., 2008), have a significantly higher mortality risk

* Corresponding author.

E-mail address: wimmers@fbn-dummerstorf.de (K. Wimmers).

compared to heavier littermates (Baxter et al., 2008; Panzardi et al., 2013; Schild et al., 2020). Irrespective of birth weight, the preweaning mortality has been reported to range between 15 and 20% on average (Kielland et al., 2018; Nuntapaitoon et al., 2018), which raises both economic and ethical concerns. Most losses occur during the early postnatal adaptation phase, i.e. within the first three to four days of life (Baxter et al., 2008; Baude et al., 2022; Gladbach, 2022). In this context, sufficient vitality is considered important for the survival of the piglets (Baxter et al., 2008). Vitality at birth is expressed by physical activity, early suckling, and skin colour (Panzardi et al., 2013; Schodl et al., 2019) and is influenced by various factors, e.g. birth weight (Tuchscherer et al., 2000; Baxter et al., 2008; Blim, 2020) and birth order (Tuchscherer et al., 2000; Baxter et al., 2008; Langendijk and Plush, 2019).

The animal-intrinsic responses in adapting to extra-uterine life consist of three phases as reviewed previously by Diehl et al. (2022). The first phase includes the onset of breathing and the adaptation of the cardiovascular system immediately after birth. With the shift from the intrauterine to the extrauterine environment, the neonatal piglet needs to adjust its body temperature and acid-base balance within the first 24 h of life. Neonates exhibit a poor status of endogenous energy reserves, i.e. protein and glycogen content of body stores (Herpin et al., 2002; Theil et al., 2011) and are therefore dependent on colostrum and transient milk, to obtain macromolecules for energy utilisation as well as immune components for the acquisition of passive immunity (Le Dividich et al., 2005; Pedersen et al., 2011). In the second phase of neonatal adaptation, homeostasis and organ maturation are established (up to 14 days *postnatum*). As development progresses, the liver becomes fully functional, enabling vital protein synthesis. Concurrently, the kidneys attain their full physiological capacity, allowing for the regulation of plasma molarity and volume, thus maintaining fluid homeostasis within the body. The final third phase (up to the 28th day of life) shapes neurological, immunological and muscular characteristics (Diehl et al., 2022).

Low birth weight piglets require more time to reach the udder (Baxter et al., 2008; Pedersen et al., 2011) and are disadvantaged when competing for teats with heavier littermates (Devillers et al., 2007). Furthermore, the amount of colostrum does not increase with the number of piglets and remains constant in quantity. Consequently, a smaller amount of colostrum is available for the individual piglet (Devillers et al., 2007). Due to the unfavourable surface-to-volume ratio, low birth weight piglets are particularly prone to rapid cooling and hypothermia compared to heavier littermates (Tuchscherer et al., 2000; Kammergaard et al., 2011; Quesnel et al., 2023), and therefore require a high amount of energy metabolites for thermoregulation in relation to their BW (Noblet et al., 1987; Tucker et al., 2022). Genetics also appear to be relevant, as Meishan piglets with an average birth weight of 0.46 kg less than Large White piglets do not have a higher preweaning mortality rate (Lee and Haley, 1995). Management strategies discussed for successful neonatal adaptation that influence piglet vitality and survival include the sow's housing conditions during parturition and early lactation, i.e. conventional farrowing crates or farrowing pens without fixation. However, there are inconsistent reports on piglet mortality in relation to housing systems, with higher preweaning mortality reported for piglets kept in farrowing pens (Marchant et al., 2000; Nicolaisen et al., 2019), while others found no differences (Pedersen et al., 2011; Kilbride et al., 2012; Höbel, 2019).

This study investigates piglets from two pig breeds, which differ fundamentally in performance, body composition, and breeding history. The German Landrace (GL) represents a modern, commercial line with pronounced maternity traits, whereas the German Saddleback (GS) is a non-commercial, indigenous breed. The GS

has been described to exhibit a lower lean meat content than GL animals (Nürnberg et al., 1997). The gestation length of GS is approximately 1.2 days shorter compared to GL sows (Gladbach, 2022). The breeds GL and GS differ in parturition characteristics, such as a shorter farrowing duration of the GS (GS: 173.0 ± 104.7 min; GL: 266.6 ± 126.1 min), as well as in performance traits like litter size (GL: 14.7 ± 3.61 ; GS: 11.4 ± 3.08 total born piglets) (Gladbach, 2022). We hypothesised that the interaction between genotype and housing environment is relevant for the neonatal adaptation of low birth weight piglets ($< 1\ 100$ g) and that this interaction is verifiable via the blood metabolite profile. The aim of the study was to quantify plasma markers for energy utilisation, organ maturation, and stress response in neonates and suckling piglets depending on (i) the genetic background, (ii) the housing system, and (iii) birth weight.

Material and methods

Experimental groups, housing conditions and management

In order to investigate the effects of (i) breed, (ii) housing and (iii) birth weight class on the metabolic parameters of the piglets, the statistical design aimed at recording at least 5 litters per experimental sow group (breed $\times$ housing) to obtain a total of 96 piglets representing the experimental groups (breed $\times$ housing $\times$ BW class). Four experimental sow groups were analysed, consisting of 10 GL and 17 GS multiparous sows of parities two to eight (GL rate: 4.0 ± 0.55 ; GL pen: 4.2 ± 0.92 ; GS rate: 5.4 ± 0.98 ; GS pen: 3.6 ± 0.63). Notably, 12 sows were included in the 'GS farrowing pen' group instead of the planned five due to homogeneity of birth weight in some litters, i.e., few numbers of hypotrophic piglets and missing samples during the suckling period due to piglet losses. Sows were synchronised and artificially inseminated and group-housed until moving to the farrowing-station at 105 dpc (days *postconception*). Sows of both breeds were housed in two different farrowing systems, i.e., crates and pens (Fig. 1). Both housing systems had a total floor space of 6.5 square metres containing a creep area. The crate housing was applied one day prior to the estimated parturition for a period of five days. The accessible area for sows in crates was limited to 180×60 – 70 cm. For the pen housing, the sows had access to the entire area of 6.5 square metres except the creep-area. To approximate commercial conditions, a heating plate (76×60 cm) and a heating lamp were offered to the offspring in the creep-area (temperature $30\ ^\circ\text{C}$). The temperature in all farrowing compartments was set to $22\ ^\circ\text{C}$ and computer-controlled together with the ventilation. From 105 dpc, all sows were fed twice daily in a total of 3.2 kg/day of a commercial gestation diet containing 12.2 MJ metabolisable energy per kg DM (Supplementary Table S1). From 109 dpc, the sows were switched to a commercial lactation diet with a higher energy content of 13.2 MJ metabolisable energy per kg DM, and the daily feed amount remained at 3.2 kg/day (Supplementary Table S1). On 112 dpc, the amount of feed was reduced to 2 kg/day. Water was provided *ad libitum*. Partus induction was applied for all 27 sows in consideration of the specific gestation length of GS and GL sows, respectively. The farrowing process was induced with a standard regimen of prostaglandin $F_{2\alpha}$ (PGF $_{2\alpha}$) and carbetocin, where 0.175 mg cloprostenol (2 ml PGF Veyx forte[®]; Fa. Veyx, Schwarzenborn, Germany) was applied at 112 dpc in GS sows and at 114 dpc in GL sows. At 113 dpc (GS) or 115 dpc (GL), sows received 70 μg carbetocin (1 ml Depotocin[®]; Fa. Veyx). Both injections were given intramuscularly.

Monitoring of sows and parturition data

All sows were video-monitored throughout the entire periparturition period. The farrowing of all sows were supervised. The *partus* was

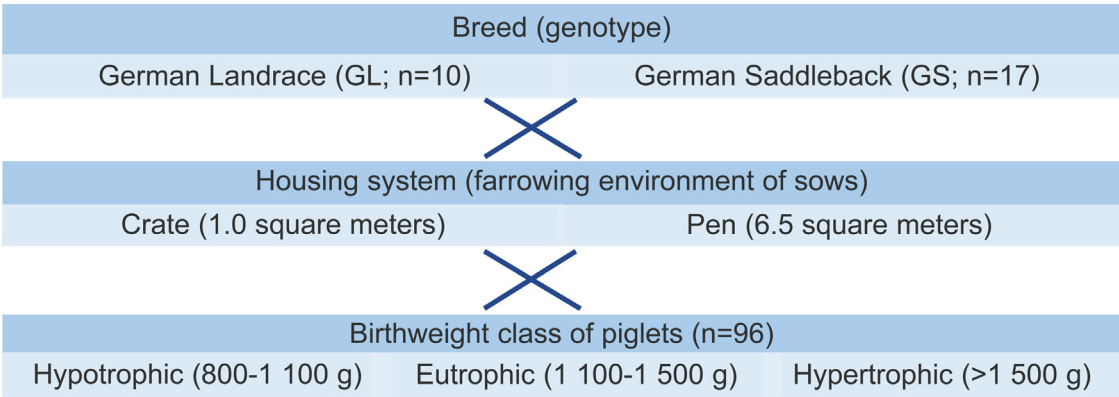


Fig. 1. Experimental groups to evaluate metabolic parameters of piglet vitality due to genotype, housing condition, and birth weight. German Landrace (GL) and German Saddleback (GS) sows were artificially inseminated and group-housed until 105 days *postconceptionem* (dpc). After entering the farrowing station, they farrowed in two different housing systems, i.e., crates and pens. The birth induction in the GS was done at 112/113 dpc and in the GL at 114/115 dpc with cloprostenol and carbetocin, respectively. Piglets from the four experimental sow groups were assigned according to birth weight as hypotrophic (800–1 100 g), eutrophic (>1 100–1 500 g), and hypertrophic (>1 500 g). Each experimental piglet group was represented by eight animals (n = 96) selected for repeated blood analyses during the whole suckling period.

defined as the time between the expulsions from the first to the last piglet. If there were inter-farrowing-intervals ≥ 60 min, manual obstetrics was performed. The farrowing length was recorded. Additionally, the time of birth was recorded for each individual piglet and inter-farrowing-intervals were calculated. Numbers of live-born piglets, stillborn piglets, and mummified piglets were recorded. Piglet mortality was recorded daily.

Piglet birth weight classification

After completion of the farrowing, the piglets were weighed and categorised by their birth weight. Applied birth weight classes were based on the stock percentiles of 135 GS-neonates and 13 620 GL-neonates retrieved from the herd data of the Research Institute for Farm Animal Biology (FBN) experimental station (unpublished results). Piglets with birth weights 800–1 100 g were defined as hypotrophic, from 1 100–1 500 g as eutrophic, and > 1 500 g as hypertrophic neonates. The cut-off at a birth weight < 800 g was set to minimise effects from intrauterine growth retardation (IUGR). For downstream data analyses, eutrophic and hypertrophic piglets were summarised as control piglets.

Clinical parameters

Body weight of all piglets was recorded after the first colostrum intake. In addition, the BW of those piglets (n = 96) that were assigned to the respective birth weight classes was recorded at 24 h (day 1), day 4, day 20 of life, and one day after weaning. Individual rectal temperature was measured after the first colostrum intake and on day 1. As shown in Table 1, the vitality from the piglets was quantified with a score based on Zaleski and Hacker (1993). Scores from 0 to 2 were assigned for each of the four parameters (breathing, skin-color, standing attempts, meconium staining) and summarised, resulting in vitality scores between 0 and 8. It was carried out by one veterinarian. The time from birth to first suckling was recorded.

Piglet management

Cross-fostering was not intended, except for three litters where the number of live-born piglets exceeded the number of functional teats on the sow, necessitating cross-fostering on day 1 of lactation. The piglets sampled during the suckling period always remained with their original litter. On the first day of life, the piglets received oral iron supplementation with additional vitamins

Table 1
Vitality score applied to swine neonates. Source: Zaleski and Hacker (1993)

Parameter	Score		
	0	1	2
Breathing	Absent	First breath >15 s	First breath < 15 s
Skin-color	Pale	Cyanotic	Pink
Standing attempts	> 5 min	< 5 min	< 1 min
Meconium	Moderate to high amount	Low amount	Absent

(PUCORAL® FerroPlus, Pulte GmbH & Co. KG, Germany) and at day 14 of life an iron-injection (Ursoferran® 100 mg/ml, Serumwerk Bernburg, Germany). The piglets received a prestarter (Hakra-Immuno-G, 15.2 MJ/kg, 18.8% CP, Una Hakra) via an automatic feeder from day 14 of life. At the age of 21 days, the piglets were vaccinated against *Lawsonia intracellularis* (ENTERISOL® ILEITIS, Boehringer Ingelheim Vetmedica GmbH, Germany). The piglets were weaned at day 28 of life (GL piglets) and at day 30/31 of life (GS piglets), reflecting the differences in gestation length.

Blood sampling

Blood sample was taken from the *Vena jugularis* of all live-born piglets between 0.5 and 6 h of age, and the time of sampling was recorded (n = 329). At least one completed suckling event took place before sampling. Eight piglets were selected from each of the four experimental sow groups and the three birth weight classes (n = 96), which were monitored throughout the whole suckling period (Fig. 2). The eight piglets in each of the 12 experimental groups (2 breeds $\times$ 2 housing conditions $\times$ 3 birth weight classes) originate from > 3 litters to represent biological variation. To cover the neonatal adaptation period, blood samples were taken at 24 h (day 1) and day four of life (day 4). In addition, blood samples were obtained at day 20 and 1–day postweaning (GL: day 29; GS: day 31/32) to monitor changes elated to organ maturation, development, and weaning. Blood collection was performed using potassium-ethylenediaminete traacetate (K-EDTA) tubes (Sarstedt, Nümbrecht, Germany). EDTA-samples were stored on ice and centrifuged (3 500 revolutions per minute; 4 °C; 15 min). Plasma was stored at –80 °C until analysis.

Plasma analyses of hormones and metabolites

Total protein, albumin, blood urea nitrogen, creatinine, ammonia, triglycerides, uric acid, sodium and chloride were quantified



Fig. 2. Sampling time points to evaluate metabolic parameters of piglet vitality due to genotype, housing condition, and birth weight class. At an age of 0–6 h, blood samples were taken from all live-born piglets ($n = 329$) of the supervised parturitions as indicated by the green dot. A subset of $n = 96$ piglets was selected according to birth weight class and subsequently longitudinal blood samples were taken at 24 h (day 1), day 4, day 20, and one-day postweaning as indicated by orange dots. GL = German Landrace; GS = German Saddleback.

in plasma via commercial kits (FUJI Dri-Chem 4000i, FujiFilm, Minato, Japan). Levels of plasma fructose, glucose, inositol, and lactate were quantified via HPLC (Agilent, Waldbronn, Germany) as described previously (Metges et al., 2014). Plasma levels of non-esterified fatty acids were quantified as single measurements with an automatic enzymatic analyser (ABX Pentra 400, HORIBA Medical, Montpellier, France) using kits (WAKO Chemicals GmbH, Neuss, Germany). Plasma haptoglobin (cat.-no. HAPT-9, Life Diagnostics, Inc., West Chester, Pennsylvania, USA) was determined in duplicate according to the manufacturer's protocol. Cortisol (cat.-no. EIA-1887, DRG Diagnostics GmbH, Marburg, Germany), insulin (cat.-no. EIA-4747, DRG Diagnostics GmbH, Marburg, Germany), and total triiodothyronine (cat.-no. EIA-4569, DRG Diagnostics GmbH, Marburg, Germany) were analysed in duplicate via commercial ELISAs. Not all parameters were measured at each of the time points. A corresponding overview is stated in [Supplementary Table S2](#). Dynamic ranges and coefficients of variation (CV) for the applied methods are shown in [Supplementary Table S3](#).

Statistical evaluation

Data on farrowing characteristics were analysed by a two-way ANOVA considering breed and housing system as main factors (R language v4.2.2; R package 'car', v3.1.1; R foundation for statistical computing, Vienna, Austria). For the relative numbers of live-born and stillborn piglets, litter size as an additional co-variable was included. The pairwise comparison of the mean values between experimental piglet groups assigned due to breed $\times$ housing system $\times$ birth weight class was carried out using the Tukey post-hoc test. A chi-square test was carried out to test whether hypotrophic piglets die more often compared to heavier littermates. The effect of litter size on the number of piglets per birth weight class was tested using a linear model, as was the effect of inter-farrowing intervals on the number of stillborn piglets.

Differences in plasma parameter profiles between the birth weight classes were assessed using a permutation test (R package 'RVAideMemoire', v0.9-83-7). Moreover, metabolite data were interrelated by birth weight class using a Partial Least Squares Discriminant Analysis (R package 'mixOmics', v6.24) (Rohart et al., 2017). The variable selection and classification processes were considered two components. For the statistical evaluation of plasma metabolites, a rank-based inverse normal transformation was applied as raw data showed deviation from a normal distribution (R package 'RNOmni', v1.0.1.2). In a repeated measurements approach, the influence of breed, housing system, birth weight class, and time as fixed effects as well as the interactions of breed $\times$ housing system, breed $\times$ birth weight class, housing system $\times$ birth weight class, and breed $\times$ housing system $\times$ birth weight class were analysed (R package 'stats'). Additionally, each individual time point was evaluated via a linear model with breed, housing system, and birth weight class as fixed effects as well as the interactions of breed $\times$ housing system, breed $\times$ birth weight class, housing system $\times$ birth weight class, and breed $\times$ housing

system $\times$ birth weight class (R package 'stats'). In order to evaluate potential temporal effects on the total plasma protein (0–6 h vs day 1) and plasma triglyceride levels (day 1 vs day 4 vs day 20), the linear model included the effect of sampling time point. The difference between age at sampling [min] and first colostrum intake [min], representing the individual duration for digestion, was considered as co-variable at the first time point. The pairwise comparison of the mean values between experimental groups was carried out using the Tukey posthoc test. The significance level was set at $P < 0.05$. All results are presented as mean $\pm$ SEM.

Results

Farrowing characteristics

In order to achieve the required number of piglets per experimental group, the number of litters varied due to the partly homogeneous birth weights and the need for a complete time series ([Table 2](#)). Notably, 3 of 12 sows in group GS (pen) were kept in the analyses of farrowing characteristics but none of their piglets were included in blood analyses due to incomplete time series. The breed-specific conditions regarding gestation length were mimicked with the applied *partus* induction protocol. All GL sows received both PGF_{2 α} and carbetocin, but only 29.4% of GS sows received carbetocin at 24 h after PGF_{2 α} administration, because farrowing had already started. Details on farrowing characteristics, litter size, litter weight and the numbers of live-born and stillborn piglets as well as mummies observed in the respective sow groups are shown in [Table 2](#). Neither farrowing length (breed: $P = 0.131$; housing system: $P = 0.706$) nor individual farrowing intervals (breed: $P = 0.728$; housing system: $P = 0.767$) were different between GL and GS and between farrowing crates and pens. Litter size ($P = 0.018$) as well as the number of live-born piglets ($P = 0.013$) were higher in GL compared to GS, but the litter weight was influenced neither by the breed ($P = 0.128$) nor by the housing system ($P = 0.784$). The analyses revealed an effect of the housing system on stillborn piglets ($P = 0.025$) whereby the absolute number of stillbirth was higher in the farrowing pens than in the farrowing crates. As shown in [Table 2](#), no other litter characteristics were affected by breed or housing system. There was no effect of the inter-farrowing intervals for the number of stillborn piglets ($P = 0.659$). The preweaning mortality was independent of breed ($P = 0.683$) and housing system ($P = 0.487$), but hypotrophic piglets died more often than their heavier littermates ($P = 0.047$).

Vitality score and rectal temperature

The vitality score of the 96 in-depth phenotyped piglets was affected by the housing system (farrowing crate: 7.2 ± 0.2 ; farrowing pen: 7.0 ± 0.2 ; $P = 0.033$), while the factor breed showed no effect (GL: 7.2 ± 0.2 ; GS: 7.2 ± 0.2 ; $P = 0.305$). At 0–6 h *postnatum*, the body temperature was dependent on the birth weight class (hypotrophic: 36.9 ± 0.2 °C, control littermates: 37.4 ± 0.1 °C;

Table 2
Farrowing parameters in German Landrace (GL) and German Saddleback (GS) sows kept in farrowing crates one day prior to the estimated parturition for a period of five days and farrowing pens. All farrowings were induced with PGF_{2α} (Prostaglandin F_{2α}) at 115 (GL) or 112 (GS) days *postconceptionem* (dpc). Carbetocin was administered 24 h later to all GL sows and to 29.4% of the GS sows. Data are presented as mean ± SEM.

Item	GL		GS		SEM	P-value		
	Farrowing crate	Farrowing pen	Farrowing crate	Farrowing pen		B	H	B × H
No. of observed litters	5	5	5	12				
Farrowing length [min]	267.6	284.5	185.0	152.7	17.88	0.131	0.706	0.982
Inter-farrowing interval [min]	17.8	15.7	15.7	17.1	1.73	0.728	0.766	0.687
Litter size [n]	16.4	19.0	12.2	11.9	0.73	0.018	0.129	0.195
Live-born piglets [n]	16.0	15.8	11.2	10.3	0.72	0.013	0.911	0.750
Stillborn piglets [n]	0.4	3.2	1.0	1.7	0.38	0.176	0.025	0.176
Live-born piglets [%]	97.5	83.3	92.0	86.7	2.43	0.351	0.150	0.484
Stillborn piglets [%]	2.5	16.7	8.0	13.3	2.43	0.351	0.150	0.484
Mummies [n]	0.4	0.2	0.6	0.5	0.19	0.761	0.761	0.907
Litter weight [kg]	20.6	21.3	16.7	15.3	0.88	0.128	0.784	0.539
Hypotrophic piglets [n]	4.8	4.0	1.6	1.6	0.55	0.070	0.639	0.725
Eutrophic piglets [n]	7.2	5.8	4.0	3.8	0.57	0.083	0.436	0.264
Hypertrophic piglets [n]	4.2	6.6	5.6	4.8	0.64	0.526	0.281	0.949
Prewaning mortality [%]	14.6	22.0	14.6	18.3	2.10	0.683	0.487	0.386
Weaned piglets [n]	13.4	11.6	9.6	8.3	0.58	0.309	0.020	0.002

B = breed; H = housing system.

$P = 0.008$), whereas no effect of breed (GL: 37.3 ± 0.1 °C; GS: 37.2 ± 0.2 °C; $P = 0.127$) and housing system was observed (crate: 37.2 ± 0.2 °C; pen: 37.3 ± 0.1 °C; $P = 0.903$). On day 1, the rectal temperature was affected by breed (GL: 37.8 ± 0.1 °C; GS: 38.1 ± 0.1 °C; $P = 0.013$), while the applied housing system showed no difference (crate: 38.1 ± 0.1 °C; pen: 37.8 ± 0.1 °C; $P = 0.244$).

Evaluation of BW

The GS piglets showed a higher average birth weight ($P = 0.049$) than the GL piglets when considering all 329 live-born piglets (GS: 1.5 ± 0.03 kg; GL: 1.3 ± 0.03 kg). While the GL had 15.9 ± 0.95 live-born piglets, the GS had only 10.5 ± 0.62 live-born piglets ($P = 0.013$; Table 2). The number of hypotrophic and eutrophic piglets was depending on the number of total born piglets (hypotrophic: $P < 0.001$; eutrophic: $P = 0.002$), but the number of hypertrophic piglets was independent of the litter size ($P = 0.971$). When considering the 96 piglets selected by birth weight, the repeated measurement analysis revealed that the BW was affected by breed ($P = 0.026$), birth weight class ($P < 0.001$), and time ($P < 0.001$), and a tendency due to the housing system ($P = 0.056$) (Table 3). An interaction for the bodyweight was observed between the housing system × the birth weight class in the repeated measurement approach. When analysing the individual time points, no effect of the single factors breed or housing system on BW was found. Analyses of BW showed an interaction between breed × birth weight class on day 4 ($P = 0.024$) and between breed × housing system on day 20 ($P = 0.008$). Hypotrophic piglets had consistently lower BWs compared to the con-

trol littermates at all applied time points (Fig. 3), with a lowered BW by 34.2% on day 1 and by 18.8% less on the day *postweaning*.

Evaluation of plasma metabolites via partial least squares-discriminant analysis

According to the results of the partial least squares-discriminant analysis based on the plasma metabolites data (Fig. 4), hypotrophic piglets were partially discriminated from eutrophic piglets (adjusted $P = 0.026$; Fig. 4A), whereas the discrimination of hypotrophic vs hypertrophic littermates showed a trend (adjusted $P = 0.063$; Fig. 4B). Moreover, animals assigned to the eutrophic and hypertrophic birth weight classes had a similar metabolic profile (adjusted $P = 0.272$; Fig. 4C). From these, i.e., both eutrophic and hypertrophic piglets, the hypotrophic piglets were partially discriminated (adjusted $P = 0.025$; Fig. 4D). Therefore, the subsequent analysis focussed on the differences between piglets with a low birth weight (800–1 100 g) and their larger littermates with a birth weight of > 1 100 g, referred to as control littermates.

Comprehensive longitudinal evaluation of plasma metabolites

The repeated measurement analyses revealed effects on the plasma lactate level (Supplementary Table S4) due to breed and housing system as well as due to the three-way interaction between breed, housing system, and birth weight class. Both insulin and glucose levels were dependent on the birth weight class, whereas the latter were additionally influenced by the housing

Table 3
BW of neonates and suckling piglets at 0–6 h, day 1, day 4, day 20, and one-day *postweaning*. The data were collected from selected piglets (n = 96) assigned to two birth weight classes of German Landrace (GL) and German Saddleback (GS) breeds born either in farrowing crates or farrowing pens. Data are presented as mean ± SEM.

Parameter per time point	B		H		BWC		SEM	P-values for interactions of B × H
	GL	GS	Farrowing crate	Farrowing pen	800–1 100 g	>1 100 g		
BW								
0–6 h [kg]	1.36	1.40	1.36	1.40	1.04 ^A	1.54 ^B	0.032	0.958
Day 1 [kg]	1.36	1.46	1.39	1.43	1.05 ^A	1.59 ^B	0.035	0.767
Day 4 [kg]	1.88	2.01	1.93	1.96	1.51 ^A	2.15 ^B	0.047	0.242
Day 20 [kg]	6.08	6.08	6.01	6.14	5.12 ^A	6.49 ^B	0.136	0.024
Postweaning [kg]	7.78	8.19	7.77	8.22	6.87 ^A	8.50 ^B	0.185	0.186

B = breed; H = housing; BWC = birth weight class.

^{A,B}Different superscripts indicate statistical significance per individual time point within birth weight class ($P < 0.05$).

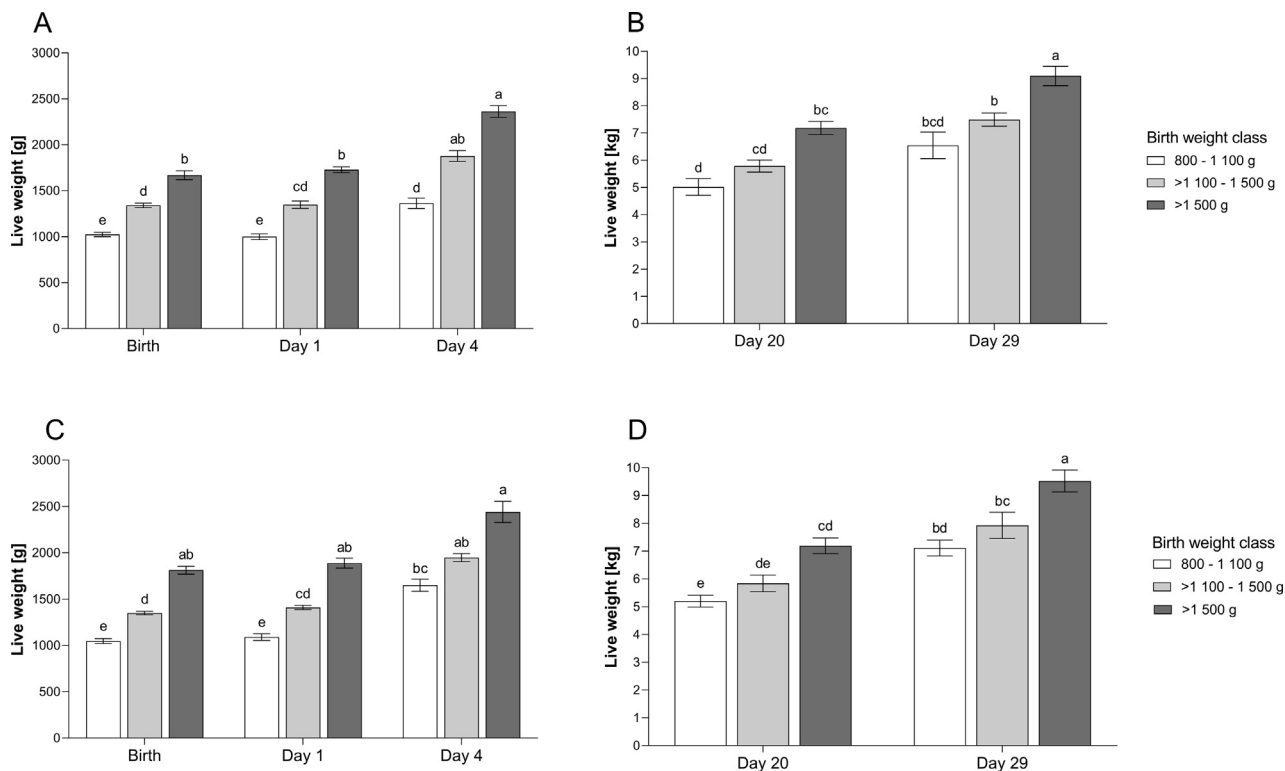


Fig. 3. BWs of German Landrace (A, B) and German Saddleback (C, D) piglets assigned to hypotrophic (800–1 100 g), eutrophic (1 100–1 500 g), and hypertrophic (> 1 500 g) piglets during the neonatal adaptation period (A, C) as well as at day 20 and one-day postweaning (B, D). Data are presented as mean $\pm$ SEM. ^{a,b,c,d,e} Different superscripts highlight significant differences ($P < 0.05$).

system. Moreover, a significant two-way interaction between the breed and housing system was observed for plasma glucose. The plasma inositol levels were dependent on the housing system, birth weight class, and time. For plasma fructose, which was quantified only within 0–6 h *postnatum* (undetectable at day 1 and day 4), the two-way interaction between breed and housing system was significant. The plasma non-esterified fatty acid concentrations showed significant effects due to the housing systems and time. Plasma triglycerides showed effects due to time. Both plasma total protein and albumin levels were dependent on breed and time. Plasma urea levels were affected by time and the two-way interaction between breed and birth weight class, whereas ammonia levels were dependent on breed. The plasma creatinine concentration was dependent on the housing system, birth weight class, time, and the two-way interaction between breed and housing system. For uric acid, the analyses showed significant effects of breed, birth weight class, and time. The plasma triiodothyronine concentration was independent of the experimental factors investigated. The haptoglobin levels revealed a significant two-way interaction between breed and housing system. The plasma cortisol levels were dependent on the housing system and time. The plasma levels for the electrolytes sodium and chloride were dependent on breed. Additionally, sodium levels were dependent on birth weight class and time, while for chloride, there was a significant two-way interaction between the housing system and birth weight class.

Plasma metabolites related to energy metabolism per time point

The plasma lactate levels (Table 4) were 25% lower in GS piglets compared to GL piglets at day 1 ($P = 0.025$) and 41% lower at day 4 ($P = 0.004$). Pen-born piglets had significantly lower plasma lactate levels at day 1 compared to piglets born to crated dams. There was

a three-way interaction on plasma lactate concentrations between breed, housing system and birth weight class at day 4. Plasma lactate levels were independent from birth weight class. There was a significant two-way interaction on the plasma lactate concentration between the breed and housing system at day 4. Plasma insulin concentrations were higher in GS piglets compared to GL piglets on day 1 ($P = 0.024$) and day 4 ($P = 0.027$), but insulin levels were unaffected by the housing system and birth weight class. Plasma glucose levels were higher in GL piglets compared to GS piglets on day 4 ($P = 0.002$). The glucose levels in piglets born in the farrowing pens were reduced compared to piglets born to sows kept in crates on day 1 ($P = 0.018$) and day 4 ($P = 0.010$). The birth weight class showed an effect as plasma glucose levels were 21% lower on day 1 ($P = 0.031$) and 4% lower on day 4 ($P = 0.006$) in hypotrophic piglets compared to control littermates. For plasma inositol, which was only detectable at 0–6 h and day 1, piglets born in the pen showed lower levels compared to crate-born piglets with reductions of 14% at initial sampling *postnatum* ($P = 0.013$) and 7% at day 1 ($P = 0.014$). There were significant two-way interactions between breed and housing system on inositol levels 0–6 h *postnatum* and between housing system and birth weight class at day 1. Plasma inositol levels were independent of breed and birth weight class. Plasma non-esterified fatty acid levels were similar between breeds and housing systems, while hypotrophic piglets showed an increase of 42% compared to control piglets at day 4 ($P = 0.013$). Plasma triglycerides showed an increase ($P < 0.001$) from day 1 (55.2 ± 3.62 mg/dl) compared to day 4 (147.4 ± 6.42 mg/dl), followed by a decline ($P < 0.001$) until day 20 (61.0 ± 3.0 5). Hypotrophic piglets had 20% lower plasma triglyceride concentrations compared to control piglets at day 1 ($P = 0.038$). Plasma triglyceride levels were independent of breed and housing system. Compared to GL piglets, the GS piglets showed an increase of plasma total protein levels of 21% at day 4 ($P = 0.006$) and of 11%

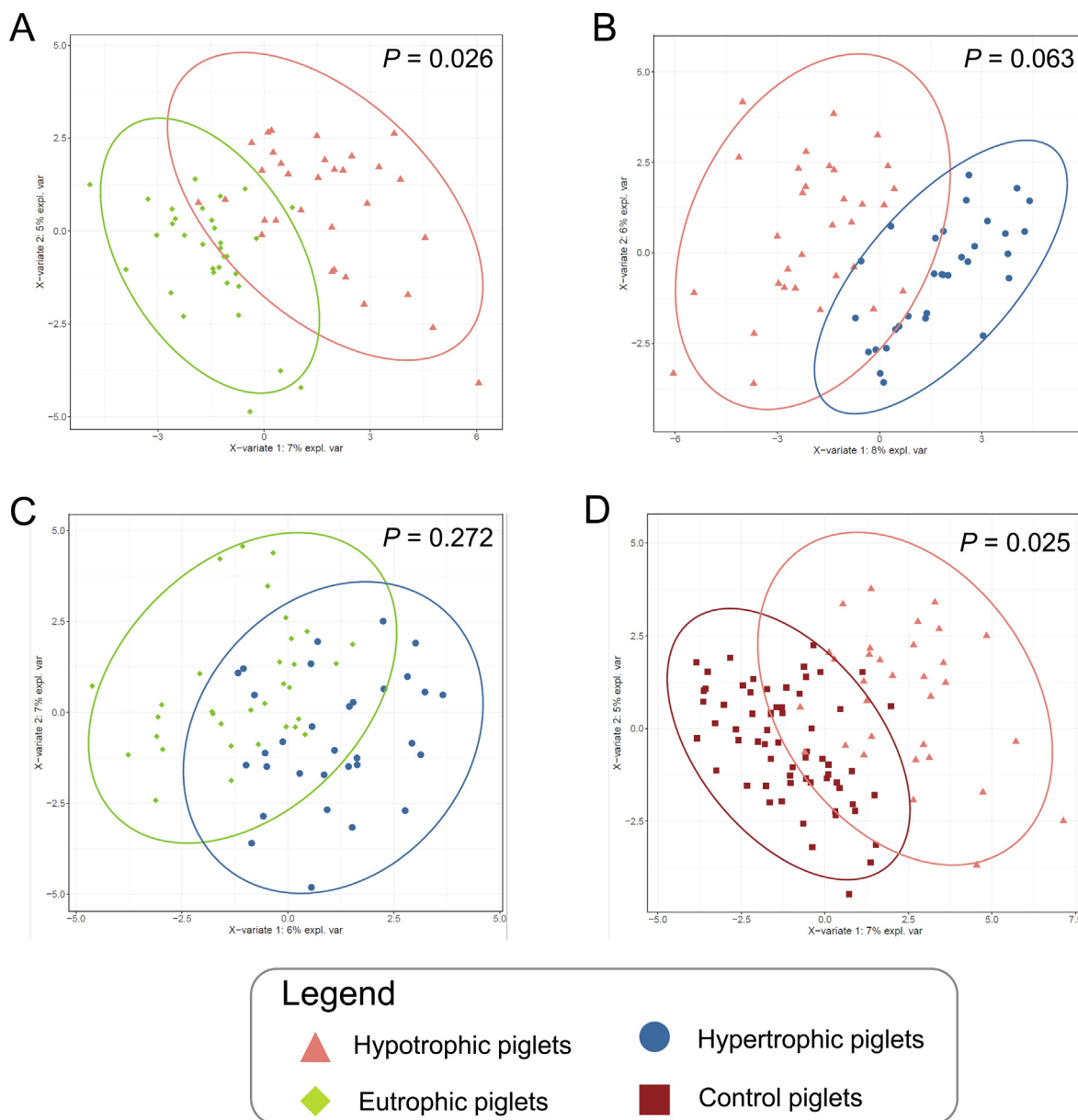


Fig. 4. Partial least squares-discriminant analysis according to birth weight classes using the available plasma metabolite data. The panel shows comparisons between (A) hypotrophic and eutrophic piglets, (B) hypotrophic and hypertrophic piglets, and (C), eutrophic and hypertrophic piglets. (D) The applied partial least squares-discriminant analysis further discriminated between hypotrophic piglets (800–1 100 g) and their eutrophic and hypertrophic littermates (> 1 100 g). Eutrophic and hypertrophic piglets were summarised as control littermates. The corresponding symbols represent individual animals and the circles indicate the 95% confidence interval for each group.

at day 20 ($P = 0.001$). There were two-way interactions between the housing system and birth weight class for the total protein at 0–6 h *postnatum* ($P = 0.044$) and between breed and birth weight class at day 1 ($P = 0.017$). Furthermore, two-way and three-way interactions between breed, housing system, and birth weight class appeared on day 20. Plasma total protein levels were increased by 93% ($P < 0.001$) between a few hours *postnatum* (2.7 ± 0.07 g/dl) and day 1 (5.2 ± 0.11 g/dl). No effect of the individual factors housing system and birth weight class was observed for plasma total protein levels. The plasma triiodothyronine levels remained unchanged due to breed, housing system, and birth weight class. Hypotrophic piglets had 50% ($P = 0.025$) higher plasma cortisol levels compared to control piglets on day 1. The difference remained until day 4, where the hypotrophic piglets showed 32% ($P = 0.011$) higher plasma cortisol levels. There was a two-way interaction effect between breed and birth weight class for the

plasma cortisol at day 20 ($P = 0.019$). For plasma cortisol, there was no significant effect of the single factors breed and housing system observed.

Plasma metabolites related to tissue maturation per time point

Fructose and haptoglobin levels appeared to be unaffected by breed, housing system and birth weight class. However, numerically higher haptoglobin levels were measured at day 1 (42%) and day 4 (131%) in GS compared to GL piglets. The analyses revealed two-way and three-way interactions on haptoglobin at day 1 and day 20. This parameter increased during the neonatal adaptation period. Plasma albumin (Table 5) concentrations were 9% higher in piglets born in the pen compared to piglets born to crated sows a few hours *postnatum* ($P = 0.036$). Albumin levels appeared to be unaffected by breed and birth weight class. The

Table 4

Plasma metabolites covering the energy metabolism assessed during the suckling period (0–6 h, day 1, day 4, day 20), and one-day *postweaning*. The data were collected from selected piglets ($n = 96$) assigned to birth weight classes of German Landrace (GL) and German Saddleback (GS) breeds born either in farrowing crates or farrowing pens. Data are presented as mean $\pm$ SEM.

Parameter per time point	B		H		BWC			SEM	P-values for interactions of B $\times$ H
	GL	GS	Farrowing crate	Farrowing pen	800–1 100 g	>1 100 g			
Cortisol [ng/ml]									
0–6 h	91.4	104.9	97.5	99.0	114.2	90.9	5.98	0.222	
Day 1	123.2	85.7	116.0	93.4	134.4 [§]	90.0 [§]	9.16	0.483	
Day 4	71.3	39.6	70.5	39.7	65.6 [§]	49.9 [§]	4.39	0.628	
Day 20	35.0	26.0	36.0	24.9	26.7	32.0	2.65	0.836	
Postweaning	32.7	48.4	45.5	36.8	41.6	40.9	2.85	0.184	
Glucose [mmol/l]									
0–6 h	5.9	6.7	6.6	6.0	5.2	6.8	0.24	0.402	
Day 1	5.9	5.9	6.2 ^A	5.6 ^B	5.0 [§]	6.3 [§]	0.18	0.056	
Day 4	7.0 ^a	6.6 ^b	6.9 ^A	6.7 ^B	6.6 [§]	6.9 [§]	0.15	0.053	
Inositol [mmol/l]									
0–6 h	4.4	5.3	5.2 ^A	4.5 ^B	6.3	4.2	0.21	0.049	
Day 1	3.0	2.8	3.0 ^A	2.8 ^B	3.5	2.6	0.12	0.169	
Insulin [mU/l]									
0–6 h	31.1	33.4	28.9	36.1	19.8	36.8	3.30	0.748	
Day 1	9.9 ^a	17.8 ^b	16.5	12.8	9.9	16.7	1.95	0.258	
Day 4	11.2 ^a	11.3 ^b	10.7	11.8	13.8	10.1	0.93	0.018	
Lactate [mmol/l]									
0–6 h	4.3	4.0	4.3	3.9	3.7	4.3	0.26	0.076	
Day 1	5.6 ^a	4.2 ^b	5.4 ^A	4.4 ^B	5.1	4.8	0.19	0.965	
Day 4	6.6 ^a	3.9 ^b	5.5	4.9	5.1	5.3	0.26	0.154	
NEFA [μ mol/l]									
0–6 h	107.6	128.5	121.7	114.6	91.5	130.9	7.61	0.757	
Day 1	125.5	139.1	126.2	138.1	137.8	129.5	4–34	0.503	
Day 4	223.1	183.7	193.3	213.5	254.4 [§]	179.5 [§]	8.97	0.135	
Day 20	275.9	305.9	313.5	270.4	300.5	287.8	14.95	0.590	
Postweaning	335.8	419.2	243.0	507.8	532.3	313.4	40.78	0.269	
Total protein [g/dl]									
0–6 h	2.7	2.6	2.6	2.7	2.3	2.8	0.07	0.057	
Day 1	4.7	5.8	5.3	5.1	5.1	5.3	0.11	0.066	
Day 4	4.4 ^a	5.3 ^b	4.8	4.9	4.8	4.9	0.07	0.090	
Day 20	4.5 ^a	4.9 ^b	4.8	4.7	4.8	4.7	0.08	0.032	
Postweaning	4.5	4.8	4.7	4.6	4.7	4.7	0.06	0.331	
Triglyceride [mg/dl]									
0–6 h	35.1	37.4	38.7	33.8	28.9	39.6	2.79	0.439	
Day 1	51.3	59.2	56.2	54.3	47.3 [§]	59.0 [§]	3.63	0.887	
Day 4	168.5	126.7	147.5	147.3	158.5	142.0	6.49	0.308	
Day 20	63.3	58.8	62.7	59.3	66.0	58.8	3.14	0.685	
Postweaning	39.2	44.0	38.3	44.9	50.2	38.1	2.93	0.207	
Triiodothyronine [ng/ml]									
0–6 h	3.9	3.1	3.4	3.7	3.0	3.8	0.25	0.885	
Day 4	6.1	3.9	4.9	5.0	4.7	5.1	0.30	0.703	

Different superscripts indicate statistical significance per individual time point ($P < 0.05$) within breed (^{a,b}), within housing system (^{A,B}), and within birth weight class (^{§,§}). B = breed; H = housing; BWC = birth weight class; NEFA = Non-esterified fatty acids.

GS piglets had higher plasma urea levels compared to GL piglets on day 20 ($P = 0.020$). Piglets born in the pen had higher plasma urea concentrations compared to piglets born to crated sows a few hours *postnatum* ($P = 0.023$). Plasma urea concentrations were 36% elevated in hypotrophic piglets compared with control piglets on day 4 ($P = 0.002$). There were significant two-way interactions between breed and birth weight class on day 4 and day 20. The plasma ammonia level was 24% lower in GS piglets compared to GL piglets on day 1. For plasma ammonia concentration, a significant three-way interaction between breed, housing system, and birth weight class was obtained one-day *postweaning*. For ammonia, no impact of the housing system and birth weight class was observed. Plasma creatinine levels were affected by the breed (0–6 h: $P = 0.001$; day 1: $P = 0.025$; $P = 0.001$) and housing system

(0–6 h: $P = 0.003$; day 1: $P < 0.001$; day 4: $P < 0.001$) during the neonatal adaptation phase. The GS piglets had higher creatinine concentrations compared to GL piglets a few hours *postnatum* ($P = 0.001$) and lower levels at day 1 ($P = 0.025$) and day 4 ($P = 0.001$). Piglets born in the pen had higher plasma creatinine concentrations compared to piglets born to crated sows during the neonatal adaptation period (0–6 h: $P = 0.003$, day 1: $P < 0.001$; day 4: $P < 0.001$) and *postweaning* ($P < 0.001$). There was a significant two-way interaction between breed and housing system on plasma creatinine throughout the neonatal adaptation period. There was a significant three-way interaction between breed, housing system, and birth weight class one-day *postweaning*, but no significant effects were found due to birth weight class. Compared to the GL piglets, GS piglets had 25% and 33% higher

Table 5

Plasma metabolites covering the tissue maturity assessed during the suckling period (0–6 h, day 1, day 4, day 20), and one-day *postweaning*. The data were collected from selected piglets ($n = 96$) assigned to birth weight classes of German Landrace (GL) and German Saddleback (GS) breeds born either in farrowing crates or farrowing pens. Data are presented as mean $\pm$ SEM.

Parameter per time point	B		H		BWC		SEM	P-values for interactions of B $\times$ H
	GL	GS	Farrowing crate	Farrowing pen	800–1 100 g	>1 100 g		
Albumin [g/dl]								
0–6 h	1.1	1.2	1.1 ^A	1.2 ^B	1.0	1.2	0.04	0.320
Day 1	1.8	2.1	2.0	1.9	1.9	2.0	0.05	0.153
Day 4	2.2	2.5	2.3	2.4	2.3	2.4	0.05	0.160
Day 20	3.9	4.0	3.9	4.0	4.1	3.9	0.06	0.227
Postweaning	3.8	4.0	3.8	4.0	3.9	3.9	0.06	0.366
Ammonia [μ g/dl]								
0–6 h	183.6	143.2	160.0	166.5	162.2	163.6	6.65	0.661
Day 1	168.3 ^a	128.6 ^b	153.3	143.8	150.0	147.7	5.19	0.667
Day 4	146.2	93.7	120.9	118.4	114.1	122.3	5.82	0.001
Day 20	125.5	115.0	122.2	117.9	116.1	121.8	6.73	0.814
Postweaning	85.8	84.1	79.5	90.0	83.6	85.4	3.67	0.823
Chloride [mmol/l]								
0–6 h	88.3	89.3	89.2	88.4	88.3 [§]	89.0 [§]	0.62	0.994
Day 1	89.5	91.2	90.9	89.7	91.7	89.8	0.68	0.601
Day 4	90.0	91.4	91.3 ^A	90.2 ^B	90.2 [§]	91.0 [§]	0.57	0.527
Day 20	87.7 ^a	94.9 ^b	92.1	90.8	92.5	91.0	0.85	0.837
Postweaning	92.7 ^a	97.9 ^b	95.8	95.1	95.2 [§]	95.6 [§]	0.92	0.446
Creatinine [mg/dl]								
0–6 h	1.63 ^a	1.87 ^b	1.70 ^A	1.80 ^B	1.75	1.74	0.062	0.010
Day 1	0.92 ^a	0.86 ^b	0.83 ^A	0.95 ^B	0.94	0.86	0.028	<0.001
Day 4	0.75 ^a	0.66 ^b	0.70 ^A	0.71 ^B	0.65	0.74	0.021	<0.001
Day 20	0.85	0.92	0.79	0.99	0.83	0.92	0.023	0.102
Postweaning	0.98	0.97	0.80 ^A	1.14 ^B	0.94	0.99	0.028	0.671
Fructose [mmol/l]								
0–6 h	2.0	2.2	2.1	2.1	2.2	2.1	0.07	0.171
Haptoglobin [μ g/ml]								
0–6 h	51.7	52.7	46.7	57.7	33.0	61.3	5.25	0.832
Day 1	120.7	171.2	121.2	169.7	157.7	139.8	8.61	0.006
Day 4	159.8	369.7	293.4	238.8	400.2	200.8	48.18	0.192
Day 20	337.8	281.1	316.0	299.5	359.5	284.1	65.03	0.080
Postweaning	474.22	380.1	439.0	408.3	504.7	388.1	43.39	0.914
Sodium [mmol/l]								
0–6 h	126.4 ^a	123.8 ^b	124.4	125.7	121.4 [§]	126.6 [§]	0.59	0.364
Day 1	130.5 ^a	127.1 ^b	129.1 ^A	128.4 ^B	127.9	129.1	0.55	0.126
Day 4	129.9 ^a	125.5 ^b	127.7	127.5	125.7	128.5	0.52	0.809
Day 20	120.2	119.0	120.1	118.7	118.0	120.2	0.88	0.201
Postweaning	121.3	119.6	119.4	121.4	118.2 [§]	121.2 [§]	0.78	0.232
Urea [mg/dl]								
0–6 h	11.9	11.7	11.4 ^A	12.2 ^B	11.6	11.9	0.25	0.051
Day 1	19.5	20.1	19.6	20.0	20.3	19.6	0.57	0.830
Day 4	8.4	6.7	7.2	7.8	9.1 [§]	6.7 [§]	0.42	0.760
Day 20	5.9 ^a	6.3 ^b	6.4	5.8	5.6	6.3	0.26	0.107
Postweaning	5.8	6.1	5.6	6.3	6.4	5.8	0.26	0.832
Uric acid [mg/dl]								
0–6 h	0.4 ^a	0.5 ^b	0.5	0.4	0.5	0.4	0.01	0.003
Day 1	0.5	0.6	0.5	0.5	0.6	0.5	0.01	0.696
Day 4	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6 [§]	0.5 [§]	0.01	0.432
Day 20	0.3 ^a	0.4 ^b	0.3	0.3	0.3	0.3	0.01	0.391
Postweaning	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.01	0.981

Different superscripts indicate statistical significance per individual time point ($P < 0.05$) within breed (^{a,b}), within housing system (^{A,B}), and within birth weight class (^{§,§}). B = breed; H = housing; BWC = birth weight class.

plasma uric acid concentrations a few hours *postnatum* ($P = 0.006$) and at day 20 ($P = 0.007$), respectively. In hypotrophic piglets, plasma uric acid levels were increased by 20% compared to control piglets on day 4 ($P = 0.018$). There was a significant two-way interaction between the breed and housing system a few hours after birth. For plasma uric acid, there was no effect of the housing system. The plasma sodium levels of GS piglets were significantly lower compared to those of GL piglets during the neonatal adapta-

tion period and ranged from 2% lower a few hours *postnatum* to 3% lower on day 4. Piglets born in the pen had lower plasma sodium levels compared to piglets born to a crated sow on day 1 ($P = 0.044$). Hypotrophic piglets had 4% ($P = 0.011$) lower plasma sodium levels compared to control piglets a few hours *postnatum* and 3% ($P = 0.007$) lower one day after weaning. There were two-way interactions between the housing system and birth weight class on day 1 and one-day *post-weaning*. The GS piglets had 8%

($P = 0.001$) higher plasma chloride levels compared to GL piglets at day 20 and 6% ($P = 0.027$) higher levels one-day postweaning. The plasma chloride concentrations were lower in piglets born in the pen compared to those born to a crated sow at day 4 ($P = 0.035$). Hypotrophic piglets had lower plasma chloride levels compared to control piglets a few hours *postnatum* ($P = 0.035$), at day 4 ($P = 0.013$), and one-day postweaning ($P = 0.039$).

Discussion

Farrowing characteristics

Results refer to the dynamics of neonatal adaptation and vitality parameters of newborn piglets with divergent genetic background, and housing conditions at farrowing, and birth weight classes. The relative proportions of live-born piglets were not different between the breeds indicating unaffected piglet viability. In fact, the observed differences in absolute litter size between commercial and traditional dam lines were to be expected and are in line with previous results (König et al., 2021; Ponsuksili et al., 2024; Gladbach, 2022). The results show that the housing conditions did not influence the length of the expulsion phase and there was no effect of the inter-farrowing intervals on the number of stillborn piglets. Nevertheless, management could affect the number of stillbirths, as indicated by the significantly higher numbers of stillbirth retrieved from farrowing pens compared to farrowing crates in this study. A number of studies analysed stillbirth rates in different housing systems with inconsistent results (Glencorse et al., 2019; Goumon et al., 2022) due to differences in prolificacy and the provision of enrichment such as straw or pen size. The preweaning mortality corresponds to the literature data of 15–20% on average (Kielland et al., 2018; Nuntapaitoon et al., 2018) and thus appears to be similar for the modern and traditional breeds analysed and the farrowing crates and farrowing pens used.

Vitality score and rectal temperature

The vitality scores appeared to be similar between GL and GS piglets, but were lower due to pen housing compared to the crate housing system. This goes along with the higher number of stillborn piglets in the pen. The rectal temperature of hypotrophic piglets was lower compared to control piglets at 0–6 h *postnatum*. In fact, hypotrophic piglets cool down more quickly due to the less favourable body surface-to-volume ratio (Herpin et al., 2002) and consequently positive correlation between birth weight and rectal temperature was reported (Baxter et al., 2008). Therefore, the selected hypotrophic neonatal piglets in this study indeed represent a vulnerable subgroup. At 24 h of life, GS piglets had higher rectal temperatures than GL, indicating different development. An effect of breed on body temperature was already observed in commercial crossbreeds, where birth weight was assumed to be a relevant factor (Schild et al., 2020).

Development of BW and discrimination of hypotrophic piglets from eutrophic and hypertrophic piglets

Considering all live-born piglets ($n = 329$), the higher average birth weight of GS piglets and the tendency for a higher number of hypertrophic piglets in GS compared to GL might reflect less intrauterine crowding and suitable nutrient availability during foetal development in traditional breeds (Vázquez-Gómez et al., 2018). Indeed, average birth weight decreases with litter size (mean and SD total number born: 15.1 ± 3.5 piglets) (Vernunft et al., 2018) and became a problem in modern pig breeds during the last decades (Knap et al., 2023). In our study, the repeated mea-

surement analysis including 96 selected piglets revealed a significant effect due to breed on BW development, which was found to be numerically higher for GS piglets at all selected time points. BW development appeared to be independent of the housing system used, suggesting that maternal environmental perceptions of available space and physical activity are not significant for nutrient allocation or colostrum production. Regarding the effects of birth weight, hypotrophic piglets consistently had lower BWs than control piglets at each selected time point until weaning, which is consistent with previous reports (Škorjanc et al., 2007; López-Vergé et al., 2018; Vodolazska et al., 2023). Blood parameter patterns of hypotrophic piglets could be separated from their heavier littermates via partial least squares-discriminant analysis analyses, with particular differences in plasma metabolites related to energy supply, organ maturation, and stress response. This allows to identify compensatory mechanisms for successful neonatal adaptation and catch-up growth.

Energy metabolism thorough neonatal adaptation

Energy is a fundamental requirement for biological processes in organisms and can be derived from endogenous reserves or exogenous sources through dietary intake. The current results show that hypotrophic piglets exhibit a fully developed thyroid hormone system which indicates a sufficiently developed orchestration of the energy metabolism (Ritacco et al., 1997; Morise et al., 2008). Newborn piglets mainly rely on limited glycogen reserves, which become depleted within approximately 10 h after birth, necessitating the restoration of glucose levels from lactate (Mota-Rojas et al., 2011). Although there might be a genetic contribution to muscle glycogen content in pigs (Liu et al., 2019), porcine neonates of breeds with pronounced differences in body composition such as Meishan and Large White exhibited similar glycogen levels (Le Dividich et al., 1991). An unaffected glycogen content might be assumed for GL and GS neonates, although glycogen contents have not been analysed in the present study. However, the GL piglets showed higher blood lactate levels compared to the GS piglets on day 1 and day 4, indicating an increased anaerobic metabolism in GL compared to GS neonates. In turn, the GS piglets might have received a higher lipid supply via the colostrum in order to maintain their energy stores. Differences in milk composition between GL and GS sows are conceivable, contributing to the observed variations in total protein content in the plasma of their respective piglets, as was described for Meishan and Yorkshire (Zou et al., 1992). The observed course of increased blood insulin levels also indicates an active regulation of lipid and carbohydrate metabolism in GS piglets, potentially aimed at replenishing glycogen stores. It is widely known that pigs of different breeds, especially those bred divergently for lean mass, exhibit differences in energy metabolism which also applies to their piglets (Nürnberg et al., 1997; Ponsuksili et al., 2024). Total protein levels were found to be higher in GS piglets on day 4 and day 20. Protein supplementation in suckling piglets was demonstrated to lead to higher total protein levels in plasma (Kósa et al., 2020).

The farrowing environment was also found to affect the carbohydrate metabolism of the piglets during the neonatal adaptation period. Although the parameters glucose, inositol, and lactate did not exhibit consistent changes over the time points evaluated, their levels were consistently lower in piglets born in farrowing pens compared to those in farrowing crates. Interpreting these observations is challenging, as the farrowing environment and the time elapsed between the last suckling and blood collection are often not comparable across studies (Nowland et al., 2019). However, a plausible explanation for the observed effects might be the increased freedom of movement afforded to sows in farrowing pens, which makes it more difficult for piglets to access the udder, requiring greater physical activity compared to their coun-

terparts in farrowing crates. This increased locomotor activity could potentially contribute to alterations in carbohydrate metabolism and utilisation in neonatal piglets, although there were no differences in BWs between housing systems.

The birth weight class of newborn piglets exerts effects on blood glucose levels on day 1 and day 4, but not at initial sampling *postnatum*. Accordingly, previous studies had not found a significant correlation between umbilical cord blood glucose levels and birth weight (Quesnel et al., 2023). Due to their lower muscle mass, altered body composition, and variable rates of hepatic glycogen mobilisation (Vanden Hole et al., 2019), low birth weight piglets are more dependent on exogenous glucose sources and are more susceptible to dietary fluctuations in the first days of life compared to their counterparts with normal birth weights. This observation is further supported by similar blood lactate values across the birth weight classes per time point, which indicate high plasma lactate levels as a general characteristic of newborn piglets (Uddin et al., 2022). Other parameters related to carbohydrate metabolism, e.g. insulin or lactate, were not affected by birth weight class at the individual time points evaluated in the present study. In previous investigations (Morise et al., 2008; Quesnel et al., 2023), plasma insulin levels were also shown to be independent of birth weight. Inositol, an important component of cell membranes and receptors, is known to exhibit elevated values in cases of intrauterine growth restriction (IUGR) (Gao et al., 2022). However, in the present study, hypotrophic piglets had comparable inositol levels, but it has to be mentioned that piglets with a birth weight < 800 g were excluded from the study to minimise the influence of IUGR on the observed parameters. Total protein content in plasma serves as an indicator of colostrum intake in neonatal piglets (Devillers et al., 2011; Quesnel et al., 2012). In the present study, the observed levels of total protein in the plasma of hypotrophic piglets suggest that these animals had sufficient colostrum intake during the early postnatal period.

Cortisol may be transferred from the sow to the piglets (Grün et al., 2013; Morgan et al., 2021), but the short-term housing of the sows in the two different farrowing environments had no effect on the stress response measurable at the piglet level. Physiological functions of cortisol comprise immunomodulation (Li et al., 2019), and stimulation of the lung function (Czock et al., 2005) essential for neonatal adaptation (Diehl et al., 2022). In this context, the observed higher cortisol release in hypotrophic piglets can be seen as a compensatory mechanism. Moreover, the catabolic effect of cortisol via mobilisation of body reserves via increased gluconeogenesis, lipolysis and protein turnover contributes to meeting the required energy metabolites of hypotrophic piglets during neonatal adaptation. Since the observed hypotrophic neonates are susceptible to the development of a hypoglycaemia-hypothermia complex, an increased release of cortisol indicates an efficient counter-control.

The high energy requirements and low endogenous reserves in hypotrophic piglets lead to elevated non-esterified fatty acid concentrations on day 4, as observed in the present study and reported previously (Stange et al., 2020). This phenomenon is likely attributable to the mobilisation of lipid reserves, although limited, to meet the increased energy demands of these piglets during the early postnatal period. Even though the hypotrophic piglets in our study show specific metabolic adaptation processes, the data indicate a sufficiently developed energy metabolism to survive. Interestingly, lipids might accumulate during the neonatal adaptation period, as the digestive kinetics increase more rapidly than the metabolic capacity (Odle, 1997).

Proxies for tissue maturation of liver and kidney

The analysed proxies for assessing tissue maturation in neonates revealed reduced ammonia and creatinine levels in the

plasma of GS compared to GL piglets during the neonatal adaptation period. Despite a shorter gestation length in GS compared to GL, this might be attributed to an increased hepatic detoxification of ammonia and an improved renal clearance of creatinine in GS piglets, as suggested previously in determining kidney maturity (Bauer et al., 2000). The metabolite results depend in part on the timing of the sucking event, which was not controlled in the experimental design prior to the initial blood sampling at 0.5–6 h. However, this bias is present in all 12 experimental groups and the measurements should therefore be regarded as informative. Plasma sodium showed a consistent breed difference, with the GS piglets having lower values and thus exhibiting physiological values of around 125 mmol/l early *postnatum*. Breed-specific differences in litter size could obviously contribute to differences in the hydration status of newborn piglets and consequently influence their blood sodium concentration in the early postnatal period (Devillers et al., 2007; Quesnel et al., 2012).

Haptoglobin levels in the blood reflect the balance between haemolysis and erythrocyte production, but can fluctuate depending on hepatic synthesis function, acute phase responses, genetic factors, and age (Alayash, 2018). Directly *postnatal*, haptoglobin is absorbed via the colostrum, thereby the neonate receiving stimulation for the hepatic synthesis (Hiss-Pesch et al., 2011). In the current study, the increase in haptoglobin levels during neonatal adaptation was consistent with results obtained for the first week of life in piglets (Martin et al., 2005), although the reported time-dependent increase in blood haptoglobin was more prominent.

Housing conditions showed elevated plasma creatinine levels in piglets born in farrowing pens compared to piglets born in farrowing crates throughout the neonatal adaptation period. This could reflect a higher level of physical activity or higher total muscle mass (James et al., 2002). Other markers of tissue maturation such as plasma albumin, sodium, chloride, and urea showed no systematic change. Elevated plasma urea and albumin levels immediately after birth could be related to the utilisation of proteins for energy production (Dazuk et al., 2019). Overall, the housing system did not indicate a major impact on organ maturity.

Newborn piglets possess low endogenous fat reserves and are heavily reliant on the intestinal absorption of triglycerides from colostrum and milk (Zhao et al., 2021). Therefore, it is conceivable that the plasma triglyceride profile of hypotrophic piglets may reflect the maturity of cells and organs, particularly their ability to metabolise ingested lipids. Additionally, the effects of teat competition among littermates could play a role, as hypotrophic piglets generally suckle on teats with lower colostrum quality and additionally ingest usually smaller amounts of colostrum compared to their heavier littermates (Milligan et al., 2002; Oliviero, 2023).

Fructose levels are used as an indicator of maturity in neonatal piglets, with higher levels observed in immature neonates compared to mature piglets (Gondret et al., 2018; Diehl et al., 2022; Quesnel et al., 2023). Thus, the hypotrophic piglets in this study appeared to be sufficiently developed, as evidenced by their fructose levels. In the hypotrophic piglets, plasma urea and uric acid levels were both elevated compared to the control piglets at day 4. The time-dependent pattern shows a decrease in the values along the suckling period, which might reflect differences in metabolic status or tissue maturation. Higher urea levels in hypotrophic piglets are thought to be caused by reduced protein synthesis, which was associated with lower muscle growth in suckling piglets (Getty et al., 2015). As the kidneys are not yet fully developed at birth (Bostedt and Walser, 2008), uric acid appears to accumulate in hypotrophic piglets during the neonatal adaptation phase, although compensation was achieved during further development. In summary, hypotrophic piglets appear to have a slight delay in organ maturation.

Conclusion

Our results provide new insights into piglet vitality and the dynamics of plasma metabolite concentrations during the suckling period in relation to different genetic background, housing conditions at farrowing, and birth weights following artificial birth induction. Both GL and GS breeds subjected to divergent housing systems exhibited breed-specific metabolite profiles to maintain neonatal adaptation. The GS piglets appeared to exhibit a higher level of tissue maturity than GL piglets, suggesting that the time of birth induction in GS at gestation day 112 is corresponding to the physiological time of birth in this breed. The farrowing environment revealed an impact on plasma glucose, inositol and lactate in neonatal piglets, potentially due to higher physical activity to access the udder in farrowing pens. The hypotrophic piglets remained small during the suckling phase and were characterised by the co-occurrence of low blood glucose levels as well as reduced body temperature, i.e., a hypoglycaemia-hypothermia complex. This can have significant implications for neonatal health and development but might be mitigated by an increased release of cortisol. Additionally, lipid metabolism appears to develop more slowly in hypotrophic piglets.

Supplementary material

Supplementary Material for this article (<https://doi.org/10.1016/j.animal.2025.101460>) can be found at the foot of the online page, in the Appendix section.

Ethics approval

The trial was carried out in accordance with the German Animal Welfare Act, approved by the Animal Welfare Committee of the Research Institute for Farm Animal Biology (FBN), Dummerstorf. The study was approved by the Ethics Committee of the federal state of Mecklenburg-Western Pomerania, Germany (LALLF M-V/TSD/7221.3-1-030/21).

Data and model availability statement

None of the data were deposited in an official repository. The data that support the study findings are available from the authors upon request.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

During the preparation of this work the author(s) did not use any AI and AI-assisted technologies.

Author ORCIDs

Heinke Lickfett: <https://orcid.org/0009-0006-1894-1230>.
Michael Oster: <https://orcid.org/0000-0002-6835-7562>.
Andreas Vernunft: <https://orcid.org/0000-0001-8147-319X>.
Henry Reyer: <https://orcid.org/0000-0001-6470-0434>.
Solvig Görs: -.
Cornelia C. Metges: <https://orcid.org/0000-0002-9498-6020>.
Hartwig Bostedt: -.
Klaus Wimmers: <https://orcid.org/0000-0002-9523-6790>.

CRedit authorship contribution statement

H. Lickfett: Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualisation, Project administration, Methodology, Investigation,

Formal analysis, Data curation. **M. Oster:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualisation, Methodology, Investigation, Funding acquisition, Formal analysis, Data curation, Conceptualisation. **A. Vernunft:** Writing – review & editing, Methodology, Investigation, Funding acquisition, Data curation, Conceptualisation. **H. Reyer:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Investigation, Data curation. **S. Görs:** Writing – review & editing, Methodology, Investigation, Data curation. **C.C. Metges:** Writing – review & editing, Investigation. **H. Bostedt:** Writing – review & editing, Supervision, Project administration, Investigation, Funding acquisition, Conceptualisation. **K. Wimmers:** Writing – review & editing, Supervision, Project administration, Investigation, Funding acquisition, Conceptualisation.

Declaration of interest

None.

Acknowledgements

The authors would like to express special thanks to Angela Garve, Gina Fiedler, Leon Borowski, Tina Illner, Magdalena Rudkowska, and Sonja Uplegger for their excellent technical help. The authors appreciate the work performed by Benjamin Diehl, Adewunmi O. Omotoso, and Maruf Hasan and the staff of the Experimental Pig Facility at FBN.

Financial support statement

The project was supported by the non-profit Tönnies Forschung gGmbH.

References

- Alayash, A.I., 2018. Oxidative pathways in the sickle cell and beyond. *Blood Cells, Molecules, and Diseases* 70, 78–86.
- Baude, B.-M., Krugmann, K., Diers, S., Tholen, E., Krieter, J., 2022. Short-term fixation of sows in farrowing pens using different opening procedures. *Livestock Science* 264, 105051.
- Bauer, R., Walter, B., Zwiener, U., 2000. Comparison between inulin clearance and endogenous creatinine clearance in newborn normal weight and growth restricted newborn piglets. *Experimental and Toxicologic Pathology* 52, 367–372.
- Baxter, E., Jarvis, S., D'eath, R., Ross, D., Robson, S., Farish, M., Nevison, I., Lawrence, A., Edwards, S., 2008. Investigating the behavioural and physiological indicators of neonatal survival in pigs. *Theriogenology* 69, 773–783.
- Blim, S.M., 2020. Über das Geburtsgeschehen bei Schweinen einer hochproliferativen Linie unter verschiedenen Haltungsbedingungen: Quantifizierung der partusrelevanten Belastung anhand klinischer, stoffwechselbezogener und ethologischer Parameter. PhD thesis, Justus Liebig University Gießen, Gießen, Germany.
- Bostedt, H., Walser, K., 2008. Neugeborenen- und Säuglingskunde der Tiere. Special study edition of the. Enke Verlag, Stuttgart, Germany.
- Czock, D., Keller, F., Rasche, F.M., Häussler, U., 2005. Pharmacokinetics and pharmacodynamics of systemically administered glucocorticoids. *Clinical Pharmacokinetics* 44, 61–98.
- Dazuk, V., Rocha Gebert, R., dos Reis, J.H., Baldissera, M.D., Paiano, D., da Silva, A.S., 2019. Glucose and urea levels in suckling piglets. *Comparative Clinical Pathology* 28, 567–569.
- Devillers, N., Farmer, C., Le Dividich, J., Prunier, A., 2007. Variability of colostrum yield and colostrum intake in pigs. *Animal* 1, 1033–1041.
- Devillers, N., Le Dividich, J., Prunier, A., 2011. Influence of colostrum intake on piglet survival and immunity. *Animal* 5, 1605–1612.
- Diehl, B., Oster, M., Vernunft, A., Wimmers, K., Bostedt, H., 2022. Intrinsic challenges of neonatal adaptation in swine. *Archives Animal Breeding* 65, 427–438.
- Gao, H., Chen, X., Zhao, J., Xue, Z., Zhang, L., Zhao, F., Wang, B., Wang, L., 2022. Integrative analysis of liver metabolomics and transcriptomics reveals oxidative stress in piglets with intrauterine growth restriction. *Biology* 11, 1430.
- Getty, C., Almeida, F., Baratta, A., Dilger, R., 2015. Plasma metabolomics indicates metabolic perturbations in low birth weight piglets supplemented with arginine. *Journal of Animal Science* 93, 5754–5763.
- Gladbach, C., 2022. Untersuchungen über den Einfluss der Gen-Umwelt-Interaktion auf klinische, endokrinologische und metabolische Parameter im Verlauf der Geburt bei einer Schweinerobustrasse (Angler Sattelschwein) und einer

- modernen reproduktiv leistungsstarken Schweinerasse (Deutsche Landrasse). PhD thesis, Justus Liebig University Giessen, Giessen, Germany.
- Glencorse, D., Plush, K., Hazel, S., D'Souza, D., Hebart, M., 2019. Impact of non-confinement accommodation on farrowing performance: a systematic review and meta-analysis of farrowing crates versus pens. *Animals* 9, 957.
- Gondret, F., Guével, B., Pere, M.-C., Quesnel, H., Billon, Y., Com, E., Canario, L., Louveau, I., Liaubet, L., 2018. Proteomic analysis of adipose tissue during the last weeks of gestation in pure and crossbred Large White or Meishan fetuses gestated by sows of either breed. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 9, 1–16.
- Goumon, S., Illmann, G., Moustsen, V.A., Baxter, E.M., Edwards, S.A., 2022. Review of temporary crating of farrowing and lactating sows. *Frontiers in Veterinary Science* 9, 811810.
- Grün, V., Schmucker, S., Schalk, C., Flauger, B., Weiler, U., Stefanski, V., 2013. Influence of different housing systems on distribution, function and mitogen-response of leukocytes in pregnant sows. *Animals* 3, 1123–1141.
- Herpin, P., Damon, M., Le Dividich, J., 2002. Development of thermoregulation and neonatal survival in pigs. *Livestock Production Science* 78, 25–45.
- Hiss-Pesch, S., Daniel, F., Dunkelberg-Denk, S., Mielenz, M., Sauerwein, H., 2011. Transfer of maternal haptoglobin to suckling piglets. *Veterinary Immunology and Immunopathology* 144, 104–110.
- Höbel, C., 2019. Untersuchungen zum Verhalten von Sauen und Ferkeln sowie zu den Produktionsdaten in verschiedenen Abferkelsystemen. PhD thesis, Ludwig-Maximilians-Universität München, Munich, Germany.
- James, B., Goodband, R., Unruh, J., Tokach, M., Nelssen, J., Dritz, S., 2002. A review of creatine supplementation and its potential to improve pork quality. *Journal of Applied Animal Research* 21, 1–16.
- Kammersgaard, T.S., Pedersen, L.J., Jørgensen, E., 2011. Hypothermia in neonatal piglets: interactions and causes of individual differences. *Journal of Animal Science* 89, 2073–2085.
- Kielland, C., Wisløff, H., Valheim, M., Fauske, A., Reksen, O., Framstad, T., 2018. Prewaning mortality in piglets in loose-housed herds: etiology and prevalence. *Animal* 12, 1950–1957.
- Kilbride, A.L., Mendl, M., Statham, P., Held, S., Harris, M., Cooper, S., Green, L.E., 2012. A cohort study of preweaning piglet mortality and farrowing accommodation on 112 commercial pig farms in England. *Preventive Veterinary Medicine* 104, 281–291.
- Knap, P.W., Knol, E.F., Sørensen, A.C., Huisman, A.E., Van Der Spek, D., Zak, L.J., Granados Chapatte, A., Lewis, C.R., 2023. Genetic and phenotypic time trends of litter size, piglet mortality, and birth weight in pigs. *Frontiers in Animal Science* 4, 1218175.
- König, N.L., Wähner, M., Seeger, J., Sigmarsson, H.L., Kauffold, J., 2021. An investigation into uterine capacity based on litter and placental characteristics in two sow lines with different prolificacy (Danish Landrace x Danish Yorkshire versus German Saddleback). *Reproduction in Domestic Animals* 56, 34–45.
- Kósa, B., Bárdová, K., Lešková, L., Reichel, P., Novotný, J., Link, R., Húska, M., Kyzeková, P., Csörgő, A., 2020. The effect of a feed additive supplemented with porcine plasma protein on growth performance and selected biochemical indices of nursing piglets. *Acta Veterinaria Brno* 88, 393–399.
- Langendijk, P., Plush, K., 2019. Parturition and its relationship with stillbirths and asphyxiated piglets. *Animals* 9, 885.
- Le Dividich, J., Mormède, P., Catheline, M., Caritez, J., 1991. Body composition and cold resistance of the neonatal pig from European (Large White) and Chinese (Meishan) breeds. *Neonatology* 59, 268–277.
- Le Dividich, J., Rooke, J., Herpin, P., 2005. Nutritional and immunological importance of colostrum for the new-born pig. *The Journal of Agricultural Science* 143, 469–485.
- Lee, G., Haley, C., 1995. Comparative farrowing to weaning performance in Meishan and Large White pigs and their crosses. *Animal Science* 60, 269–280.
- Li, Z., Kanitz, E., Tuchscherer, M., Tuchscherer, A., Metges, C.C., Trakooljul, N., Wimmers, K., Murani, E., 2019. Kinetics of physiological and behavioural responses in endotoxemic pigs with or without dexamethasone treatment. *International Journal of Molecular Sciences* 20, 1393.
- Liu, X., Zhou, L., Xie, X., Wu, Z., Xiong, X., Zhang, Z., Yang, J., Xiao, S., Zhou, M., Ma, J., Huang, L., 2019. Muscle glycogen level and occurrence of acid meat in commercial hybrid pigs are regulated by two low-frequency causal variants with large effects and multiple common variants with small effects. *Genetics Selection Evolution* 51, 1–16.
- López-Vergé, S., Gasa, J., Farré, M., Coma, J., Bonet, J., Solà-Oriol, D., 2018. Potential risk factors related to pig body weight variability from birth to slaughter in commercial conditions. *Translational Animal Science* 2, 383–395.
- Marchant, J., Rudd, A., Mendl, M.T., Broom, D.M., Meredith, M., Corning, S., Simmins, P., 2000. Timing and causes of piglet mortality in alternative and conventional farrowing systems. *Veterinary Record* 147, 209–214.
- Martin, M., Tesouro, M., González-Ramón, N., Piñeiro, A., Lampreave, F., 2005. Major plasma proteins in pig serum during postnatal development. *Reproduction, Fertility and Development* 17, 439–445.
- Metges, C.C., Görs, S., Lang, I.S., Hammon, H.M., Brüßow, K.-P., Weitzel, J.M., Nürnberg, G., Rehfeldt, C., Otten, W., 2014. Low and high dietary protein: carbohydrate ratios during pregnancy affect materno-fetal glucose metabolism in pigs. *The Journal of Nutrition* 144, 155–163.
- Milligan, B.N., Dewey, C.E., de Graaf, A.F., 2002. Neonatal-piglet weight variation and its relation to pre-weaning mortality and weight gain on commercial farms. *Preventive Veterinary Medicine* 56, 119–127.
- Morgan, L., Meyer, J., Novak, S., Younis, A., Ahmad, W., Raz, T., 2021. Shortening sow restraint period during lactation improves production and decreases hair cortisol concentrations in sows and their piglets. *Animal* 15, 100082.
- Morise, A., Louveau, I., Le Huërou-Luron, I., 2008. Growth and development of adipose tissue and gut and related endocrine status during early growth in the pig: impact of low birth weight. *Animal* 2, 73–83.
- Mota-Rojas, D., Orozco-Gregorio, H., Villanueva-García, D., Bonilla-Jaime, H., Suarez-Bonilla, X., Hernandez-Gonzalez, R., Roldan-Santiago, P., Trujillo-Ortega, M., 2011. Foetal and neonatal energy metabolism in pigs and humans: a review. *Veterinarni Medicina* 56, 215–225.
- Nicolaisen, T., Lühken, E., Volkmann, N., Rohn, K., Kemper, N., Fels, M., 2019. The effect of sows' and piglets' behaviour on piglet crushing patterns in two different farrowing pen systems. *Animals* 9, 538.
- Noblet, J., Etienne, M., Blanchard, A., Fillaut, M., Meziere, N., Vachot, C., Dubois, S., 1987. Body composition, metabolic rate and utilization of milk nutrients in suckling piglets. *Reproduction Nutrition Développement* 27, 829–839.
- Nowland, T.L., van Wetters, W.H.E.J., Plush, K.J., 2019. Allowing sows to farrow unconfined has positive implications for sow and piglet welfare. *Applied Animal Behaviour Science* 221, 104872.
- Nuntapaitoon, M., Muns, R., Tummaruk, P., 2018. Newborn traits associated with pre-weaning growth and survival in piglets. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 31, 237.
- Nürnberg, K., Kuhn, G., Ender, K., Nürnberg, G., Hartung, M., 1997. Characteristics of carcass composition, fat metabolism and meat quality of genetically different pigs. *Lipid/fett* 99, 443–446.
- Odle, J., 1997. New insights into the utilization of medium-chain triglycerides by the neonate: observations from a piglet model. *The Journal of Nutrition* 127, 1061–1067.
- Oliviero, C., 2023. Offspring of hyper prolific sows: Immunity, birthweight, and heterogeneous litters. *Molecular Reproduction and Development* 90, 580–584.
- Panzardi, A., Bernardi, M., Mellagi, A., Bierhals, T., Bortolozzo, F., Wentz, I., 2013. Newborn piglet traits associated with survival and growth performance until weaning. *Preventive Veterinary Medicine* 110, 206–213.
- Pedersen, L., Berg, P., Jørgensen, G., Andersen, I., 2011. Neonatal piglet traits of importance for survival in crates and indoor pens. *Journal of Animal Science* 89, 1207–1218.
- Ponsuksili, S., Siengdee, P., Li, S., Kriangwanich, W., Oster, M., Reyer, H., Wimmers, K., 2024. Effect of metabolically divergent pig breeds and tissues on mesenchymal stem cell expression patterns during adipogenesis. *BMC Genomics* 25, 407.
- Quesnel, H., Brossard, L., Valancogne, A., Quiniou, N., 2008. Influence of some sow characteristics on within-litter variation of piglet birth weight. *Animal* 2, 1842–1849.
- Quesnel, H., Farmer, C., Devillers, N., 2012. Colostrum intake: Influence on piglet performance and factors of variation. *Livestock Science* 146, 105–114.
- Quesnel, H., Resmond, R., Merlot, E., Père, M.-C., Gondret, F., Louveau, I., 2023. Physiological traits of newborn piglets associated with colostrum intake, neonatal survival and preweaning growth. *Animal* 17, 100843.
- Ritacco, G., Radecki, S., Schoknecht, P., 1997. Compensatory growth in runt pigs is not mediated by insulin-like growth factor I. *Journal of Animal Science* 75, 1237–1243.
- Rohart, F., Gautier, B., Singh, A., Lê Cao, K.-A., 2017. mixOmics: An R package for 'omics feature selection and multiple data integration. *PLOS Computational Biology* 13 (11), e1005752.
- Schild, S.-L.-A., Foldager, L., Rangstrup-Christensen, L., Pedersen, L.J., 2020. Characteristics of piglets born by two highly prolific sow hybrids. *Frontiers in Veterinary Science* 7, 355.
- Schodl, K., Revermann, R., Winckler, C., Fuerst-Waltl, B., Leeb, C., Willam, A., Knapp, P., Pfeiffer, C., 2019. Assessment of piglet vitality by farmers-validation of a scoring scheme and estimation of associated genetic parameters. *Animals* 9, 317.
- Škorjanc, D., Brus, M., Čandek Potokar, M., 2007. Effect of birth weight and sex on pre-weaning growth rate of piglets. *Archives Animal Breeding* 50, 476–486.
- Stange, K., Miersch, C., Sponder, G., Röntgen, M., 2020. Low birth weight influences the postnatal abundance and characteristics of satellite cell subpopulations in pigs. *Scientific Reports* 10, 6149.
- Theil, P., Cordero, G., Henckel, P., Puggaard, L., Oksbjerg, N., Sørensen, M., 2011. Effects of gestation and transition diets, piglet birth weight, and fasting time on depletion of glycogen pools in liver and 3 muscles of newborn piglets. *Journal of Animal Science* 89, 1805–1816.
- Tuchscherer, M., Puppe, B., Tuchscherer, A., Tiemann, U., 2000. Early identification of neonates at risk: traits of newborn piglets with respect to survival. *Theriogenology* 54, 371–388.
- Tucker, B.S., Petrovski, K.R., Kirkwood, R.N., 2022. Neonatal piglet temperature changes: effect of intraperitoneal warm saline injection. *Animals* 12, 1312.
- Uddin, M.K., Hasan, S., Peltoniemi, O., Oliviero, C., 2022. The effect of piglet vitality, birth order, and blood lactate on the piglet growth performances and preweaning survival. *Porcine Health Management* 8, 52.
- Vanden Hole, C., Ayuso, M., Aerts, P., Prims, S., Van Cruchten, S., Van Ginneken, C., 2019. Glucose and glycogen levels in piglets that differ in birth weight and vitality. *Heliyon* 5, e02510.
- Vázquez-Gómez, M., García-Contreras, C., Torres-Rovira, L., Astiz, S., Óvilo, C., González-Bulnes, A., Isabel, B., 2018. Maternal undernutrition and offspring sex determine birth-weight, postnatal development and meat characteristics in traditional swine breeds. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 9, 1–15.

- Vernunft, A., Maass, M., Brüßow, K.-P., 2018. Placental characteristics of german landrace sows and their relationships to different fertility parameters. *Czech Journal of Animal Science* 63, 339–346.
- Vodolazska, D., Feyera, T., Lauridsen, C., 2023. The impact of birth weight, birth order, birth asphyxia, and colostrum intake per se on growth and immunity of the suckling piglets. *Scientific Reports* 13, 8057.
- Zaleski, H., Hacker, R., 1993. Comparison of viability scoring and blood gas analysis as measures of piglet viability. *Canadian Journal of Animal Science* 73, 649–653.
- Zhao, J., Tao, C., Chen, C., Wang, Y., Liu, T., 2021. Formation of thermogenic adipocytes: What we have learned from pigs. *Fundamental Research* 1, 495–502.
- Zou, S., McLaren, D., Hurley, W., 1992. Pig colostrum and milk composition: comparisons between Chinese Meishan and US breeds. *Livestock Production Science* 30, 115–127.

5.2 Publikation 2

Impact of parturition induction, farrowing environment and birth weight class on endocrine and metabolic plasma parameters related to piglet vitality

Heinke Lickfett, Michael Oster, Andreas Vernunft, Henry Reyer, Eduard Muráni, Solvig Görs, Cornelia C. Metges, Hartwig Bostedt, Klaus Wimmers

Eingereicht: 28.01.2025

Akzeptiert: 21.05.2025

Bibliographie

BMC Veterinary Research, Volume 21, 406 (2025). DOI: <https://doi.org/10.1186/s12917-025-04845-2>

© BMC Veterinary Research (2025)

Beschreibung des Eigenanteils am Manuskript:

Studienplanung: Michael Oster, Andreas Vernunft, Hartwig Bostedt, Klaus Wimmers

Studiendurchführung: Heinke Lickfett, Michael Oster, Andreas Vernunft, Henry Reyer, Solvig Görs

Manuskripterstellung: Heinke Lickfett, Michael Oster, Henry Reyer

Revision des Manuskriptes: Heinke Lickfett, Michael Oster, Andreas Vernunft, Henry Reyer, Eduard Muráni, Solvig Görs, Cornelia C. Metges, Hartwig Bostedt, Klaus Wimmers

Abstract:

Background

High pre-weaning mortality rate in pig husbandry is not acceptable across all production systems. Successful neonatal adaptation is key to improve piglet vitality and survival, which could be increased through adequate management practices around parturition. In this study, vitality parameters in German Landrace piglets (n = 96) are evaluated based on (i) the use or omission of hormonal parturition induction and (ii) the farrowing environment, i.e., crates (1.0 m²) or pens (6.5 m²). In addition, the effects of (iii) the allocation to birth weight classes were analysed. The aim was to quantify plasma metabolites with significance for organ maturation and energy utilization in neonates and suckling piglets with different birth weights as a function of the hormonal induction of parturition and farrowing environment in a longitudinal approach.

Results

Farrowing traits including litter size, stillborn piglets, and inter-farrowing intervals did not differ due to parturition induction nor farrowing environment ($P > 0.05$). Piglets from spontaneous parturitions required less time until the first suckling event ($P < 0.05$) and had higher rectal temperatures after 24 h than piglets from induced parturition ($P < 0.05$). Spontaneously born piglets exhibited lower plasma glucose (1d; 4d) and lactate levels (4d), but higher levels of NEFA (4d), total protein (4d; 20d), and blood urea nitrogen (1d; 20d) compared to piglets from induced parturitions ($P < 0.05$). This suggests higher organ maturation and that proteins are probably utilised primarily for growth rather than energy production during the neonatal adaptation phase, i.e., the first four days *postnatum*. Pen-born piglets exhibited lower glucose (1d; 4d), lower inositol (0.5-6.0 h; 1d), higher urea (0.5-6.0 h), and higher creatinine levels (0.5-6.0 h; 1d; 29d) compared to piglets from crated dams ($P < 0.05$), suggesting differences in energy metabolism, renal function, and physical activity between the two farrowing environments. Hypotrophic piglets showed lower plasma glucose concentrations (1d; 4d) and higher cortisol (1d; 4d) and NEFA levels (4d) indicating lipid mobilisation and induction of gluconeogenesis via muscle protein catabolism ($P < 0.05$).

Conclusion

Sow management, i.e., the induced parturition using exogenous hormones as well as the applied farrowing environment are reflected in plasma metabolite profiles of piglets and must be critically questioned in routine use with regard to the effects on piglet development.

RESEARCH

Open Access



Impact of parturition induction, farrowing environment and birth weight class on endocrine and metabolic plasma parameters related to piglet vitality

Heinke Lickfett^{1,2}, Michael Oster¹, Andreas Vernunft¹, Henry Reyer¹, Eduard Muráni¹, Solvig Görs¹, Cornelia C. Metges¹, Hartwig Bostedt² and Klaus Wimmers^{1,3*}

Abstract

Background High pre-weaning mortality rate in pig husbandry is not acceptable across all production systems. Successful neonatal adaptation is key to improve piglet vitality and survival, which could be increased through adequate management practices around parturition. In this study, vitality parameters in German Landrace piglets ($n=96$) are evaluated based on (i) the use or omission of hormonal parturition induction and (ii) the farrowing environment, i.e., crates (1.0 m^2) or pens (6.5 m^2). In addition, the effects of (iii) the allocation to birth weight classes were analysed. The aim was to quantify plasma metabolites with significance for organ maturation and energy utilization in neonates and suckling piglets with different birth weights as a function of the hormonal induction of parturition and farrowing environment in a longitudinal approach.

Results Farrowing traits including litter size, stillborn piglets, and inter-farrowing intervals did not differ due to parturition induction nor farrowing environment ($P > 0.05$). Piglets from spontaneous parturitions required less time until the first suckling event ($P < 0.05$) and had higher rectal temperatures after 24 h than piglets from induced parturition ($P < 0.05$). Spontaneously born piglets exhibited lower plasma glucose (1d; 4d) and lactate levels (4d), but higher levels of NEFA (4d), total protein (4d; 20d), and blood urea nitrogen (1d; 20d) compared to piglets from induced parturitions ($P < 0.05$). This suggests higher organ maturation and that proteins are probably utilised primarily for growth rather than energy production during the neonatal adaptation phase, i.e., the first four days *postnatum*. Pen-born piglets exhibited lower glucose (1d; 4d), lower inositol (0.5–6.0 h; 1d), higher urea (0.5–6.0 h), and higher creatinine levels (0.5–6.0 h; 1d; 29d) compared to piglets from crated dams ($P < 0.05$), suggesting differences in energy metabolism, renal function, and physical activity between the two farrowing environments. Hypotrophic piglets showed lower plasma glucose concentrations (1d; 4d) and higher cortisol (1d; 4d) and NEFA levels (4d) indicating lipid mobilisation and induction of gluconeogenesis via muscle protein catabolism ($P < 0.05$).

*Correspondence:
Klaus Wimmers
wimmers@fhn-dummerstorf.de

Full list of author information is available at the end of the article



© The Author(s) 2025. **Open Access** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Conclusion Sow management, i.e., the induced parturition using exogenous hormones as well as the applied farrowing environment are reflected in plasma metabolite profiles of piglets and must be critically questioned in routine use with regard to the effects on piglet development.

Keywords Newborn, Piglet survival, Farrowing management, Housing, Neonatal adaptation, Prematurity

Background

The successful neonatal adaptation of a piglet is key to survival and metabolic health and takes place in three distinct phases as reviewed elsewhere [1]. Immediately after birth, the piglet undergoes critical physiological transitions involving respiratory and cardiovascular systems. In fact, the first breath not only initiates lung function, but also triggers a cascade of cardiovascular adaptations that are necessary for early survival [1]. During the first 24 h, the piglet must be able to independently regulate its body temperature and acid-base balance [1]. Movements need to be coordinated to enable colostrum intake and to start an independent digestion that ensures nutrient absorption [1]. Subsequently, organs such as the kidneys and liver mature until the 14th day *postnatum* [1]. The neurological, immunological, and muscular functions are thought to be developed until 28 days *postnatum* [1]. However, neonatal adaptation proves to be insufficient for some piglets. In fact, the pre-weaning mortality is ranging from 12.4 to 21.9% found in studies with conventional conditions [2–4], thereby leading to serious financial and ethical problems. Most losses occur in the early postnatal adaptation phase, i.e., within the first three to four days of life [5–7].

The farrowing environment used in the periparturition period, i.e. conventional farrowing crates and farrowing pens, has been discussed as a factor influencing pre-weaning mortality. In some studies, a higher mortality was observed in pen housing (13.7 – 26.8%) compared to crate housing (11.8 – 17.0%) [8–10], while others did not reveal any difference in pre-weaning mortality rate between the different farrowing environments [11]. Clearly, these inconsistent results indicate the need for further investigations, especially as the causes of death are often not clearly stated. The farrowing process influences the neonatal outcome of the piglets [12], as shown by the stillbirth rate as a function of the farrowing duration. Hormonal parturition induction can shorten the total farrowing duration compared to spontaneous, non-induced farrowings in pigs [13]. However, in other studies, no effects of parturition induction on total farrowing duration was observed [14, 15], but a higher frequency of manual interventions was documented [15, 16]. In fact, the effect of standard parturition induction though hormone administration on frequency of manual intervention and animal welfare issues were rarely studied [17]. Additionally, parturition induction significantly reduces the physiological gestation length about

1–3 days depending on sow genetics [18]. Therefore, it is conceivable that a number of piglets remain immature at the time of hormonal parturition induction, which may ultimately reduce the success of neonatal adaptation and further development [1]. This applies in particular to the maturation of the kidney and liver, which might not yet be completed at the predetermined time of parturition induction. Piglet vitality is influenced by many factors such as genetics, placental vascularization, farrowing process, and birth weight [19, 20]. As litter sizes have increased during the last decades, the number of piglets born with a low birth weight has continued to rise [5, 21, 22]. Piglets with low birth weight have increased latency to first suckling [23] and have the disadvantage of competing for teats with heavier littermates [24]. Additionally, low birth weight piglets have higher heat loss due to their unfavourable surface-to-volume ratio [25] and therefore require larger amounts of energy relative to their body weight compared to littermates with a higher birth weight [26]. As a result, a relatively larger proportion of low birth weight piglets die before weaning compared with heavier littermates [5, 23, 27, 28].

We hypothesise that housing sows in pens or crates during parturition and the first four days of lactation influences the vitality and physical activity of piglets. Furthermore, we expect differences in piglet vitality based on whether they were born via induced or spontaneous parturition, potentially leading to variations in the maturity of their organ systems at birth. To this end, we conducted a longitudinal study to quantify clinical-chemical blood parameters and metabolites that reflect the vitality of neonatal and suckling piglets in relation to (i) parturition induction and labour stimulation by hormone administration, (ii) sow farrowing environment, and (iii) birth weight category. This research is part of a larger study that has already published results on an additional experimental factor, i.e. pig breed [29].

Results

Farrowing and litter characteristics

The average parity of the 18 sows monitored in this study was 4.0 ± 0.32 (mean $\pm$ SEM). The gestation length for spontaneous parturitions was 115.25 ± 0.63 days *post-conceptionem* (dpc) in crates and 115.25 ± 0.75 dpc in pens. All sows with induced parturition farrowed on 115 dpc. As stated in Table 1, farrowing traits did not differ due to parturition induction nor the farrowing environment in this experimental setting. Analyses revealed a

Table 1 Farrowing and litter characteristics of German Landrace (GL). The data were collected from spontaneous and induced parturitions in farrowing crates and farrowing pens. Data make use of entire litters and are presented as mean $\pm$ sem. Data on induced parturitions also have been analysed in a companion study [29]. Significant effects are highlighted in bold ($P < 0.05$)

Item	Spontaneous parturition		Induced parturition		P-value parturition induction	P-value farrowing environment	P-Value parturition induction $\times$ farrowing environment
	Farrowing crate	Farrowing pen	Farrowing crate	Farrowing pen			
No. of observed litters	4	4	5	5			
Farrowing duration [min]	345.25 $\pm$ 43.73	283.25 $\pm$ 62.35	267.60 $\pm$ 39.95	284.50 $\pm$ 51.50	0.265	0.841	0.480
Inter-farrowing interval [min]	21.16 $\pm$ 2.07	18.06 $\pm$ 4.14	17.80 $\pm$ 3.34	15.68 $\pm$ 2.10	0.456	0.664	0.884
Litter size [n]	17.25 $\pm$ 1.31	17.00 $\pm$ 1.87	16.40 $\pm$ 1.29	19.00 $\pm$ 0.32	0.639	0.142	0.275
Litter weight [kg]	21.42 $\pm$ 1.88	21.18 $\pm$ 1.00	20.64 $\pm$ 0.49	21.34 $\pm$ 2.60	0.760	0.772	0.794
Live-born piglets [n]	16.00 $\pm$ 1.22	15.00 $\pm$ 0.71	16.00 $\pm$ 1.34	15.80 $\pm$ 1.50	1.000	0.910	0.763
Stillborn piglets [n]	1.25 $\pm$ 0.48	2.00 $\pm$ 1.35	0.40 $\pm$ 0.24	3.20 $\pm$ 1.53	0.587	0.073	0.359
Live-born piglets [%]	92.82 $\pm$ 2.84	90.15 $\pm$ 5.98	97.50 $\pm$ 1.53	83.26 $\pm$ 8.07	0.659	0.199	0.516
Stillborn piglets [%]	7.18 $\pm$ 2.84	9.85 $\pm$ 5.98	2.50 $\pm$ 1.53	16.74 $\pm$ 8.07	0.659	0.199	0.516
Mummies [n]	0	0.25 $\pm$ 0.25	0.40 $\pm$ 0.24	0.20 $\pm$ 0.20	0.200	0.487	0.303
Hypotrophic piglets [n]	4.00 $\pm$ 0.91	3.00 $\pm$ 0.41	4.80 $\pm$ 2.42	4.00 $\pm$ 1.00	0.720	0.704	0.949
Eutrophic piglets [n]	6.50 $\pm$ 1.32	6.50 $\pm$ 1.71	7.20 $\pm$ 1.50	5.80 $\pm$ 0.80	0.720	0.450	0.613
Hypertrophic piglets [n]	5.25 $\pm$ 1.70	5.50 $\pm$ 1.50	4.20 $\pm$ 2.08	6.60 $\pm$ 1.54	0.682	0.327	0.554
Vitality score ¹	6.81 $\pm$ 0.16	6.51 $\pm$ 0.13	6.96 $\pm$ 0.12	6.67 $\pm$ 0.13	0.454	0.144	0.942
Time until first suckling [min]	24.45 $\pm$ 2.65	36.05 $\pm$ 3.57	39.74 $\pm$ 3.72	33.02 $\pm$ 2.95	0.002	0.168	0.007
Pre-weaning mortality [%]	12.75 $\pm$ 2.56	6.25 $\pm$ 2.46	14.60 $\pm$ 5.50	22.00 $\pm$ 3.67	0.513	0.600	0.252

¹ The assessment included breathing, skin colour, standing attempts, and meconium staining

Table 2 Body weight of neonates and suckling piglets at 0.5–6.0 h, day 1, day 4, day 20 and day 29. The data were collected from selected German Landrace piglets ($n = 96$) affiliated with distinct birth weight classes from induced and spontaneous parturition in farrowing crates and farrowing pens. Data on induced parturitions also have been analysed in a companion study [29]. Data are presented as mean $\pm$ sem. Significant effects are highlighted in bold ($P < 0.05$)

Time point	Parturition induction		Farrowing environment		Birth weight class	
	Induced ($n = 46$)	Spontaneous ($n = 46$)	Crate ($n = 46$)	Pen ($n = 46$)	800–1100 g ($n = 32$)	> 1100 g ($n = 64$)
0.5–6.0 h [kg]	1.36 $\pm$ 0.04	1.38 $\pm$ 0.05	1.35 $\pm$ 0.05	1.38 $\pm$ 0.05	1.02 $\pm$ 0.02^s	1.53 $\pm$ 0.03^s
1 d [kg]	1.36 $\pm$ 0.05	1.45 $\pm$ 0.05	1.41 $\pm$ 0.05	1.40 $\pm$ 0.05	1.04 $\pm$ 0.02^s	1.58 $\pm$ 0.03^s
4 d [kg]	1.88 $\pm$ 0.07	1.81 $\pm$ 0.07	1.86 $\pm$ 0.07	1.82 $\pm$ 0.06	1.36 $\pm$ 0.04^s	2.07 $\pm$ 0.04^s
20 d [kg]	6.08 $\pm$ 0.19^a	5.41 $\pm$ 0.17^b	5.85 $\pm$ 0.21^A	5.63 $\pm$ 0.17^B	4.66 $\pm$ 0.19^s	6.21 $\pm$ 0.14^s
29 d* [kg]	7.79 $\pm$ 0.26^a	6.98 $\pm$ 0.22^b	7.42 $\pm$ 0.27	7.31 $\pm$ 0.22	6.15 $\pm$ 0.30^s	7.91 $\pm$ 0.17^s

* post-weaning; different superscripts indicate statistical significance per individual time point ($P < 0.05$) due to parturition induction (^{a, b}), farrowing environment (^{A, B}), and birth weight class (^{s, s})

significant interaction of parturition induction and farrowing environment on time until first suckling. Moreover, piglets from spontaneous parturition required less time until first suckling (30.02 $\pm$ 2.25 min) than piglets from induced parturitions (35.94 $\pm$ 2.32 min; $P = 0.002$). Hypotrophic piglets were more likely to die in the first three days ($P < 0.001$; 16 losses of 70 born alive piglets) and also during the entire suckling period ($P < 0.001$; 24 losses of 70 born alive piglets) than non-hypotrophic control piglets (day 1: 13 losses of 213 born alive piglets; day 14: 20 losses of 213 born alive piglets).

Rectal temperature

Piglets from spontaneous births had higher rectal temperatures (38.3 $\pm$ 0.1 °C) compared to piglets of induced parturitions (37.8 $\pm$ 0.1 °C) on day 1 ($P = 0.025$), but not

at 0.5–6.0 h *postnatum* ($P > 0.05$). Hypotrophic piglets had lower rectal temperatures (37.2 $\pm$ 0.2 °C) than non-hypotrophic piglets (37.5 $\pm$ 0.1 °C) at 0.5–6.0 h after birth ($P = 0.022$), but not at day 1 ($P > 0.05$). The farrowing environment did not affect the rectal temperature ($P > 0.05$).

Body weight evaluation

Depending on the assignment to the birth weight classes after parturition, the body weight of the piglets remained different between the distinct birth weight classes throughout early postnatal development until weaning. This was supported by repeated measurement approach ($P < 0.001$) as well as by analyses per time-point (Table 2). When analysing the weight data using repeated observations, an effect of parturition induction ($P = 0.562$), farrowing environment ($P = 0.976$), and their two-way

interaction ($P=0.802$) was not present. However, when looking at individual time points, the effect of parturition induction became evident at day 20 ($P=0.004$) and day 29 ($P=0.026$) with lower body weights of piglets from spontaneous parturitions compared to induced parturitions (Table 2). Piglets born in the pen had lower body weights than piglets from a crated dam at day 20 ($P=0.018$).

Repeated measurements of plasma metabolites and hormones

The three-way interaction for parturition induction, farrowing environment, and birth weight class was significant for plasma chloride levels ($P=0.010$). Respective mean $\pm$ SEM per experimental group are displayed in Additional Table S1. There was a significant two-way interaction between the parturition induction and farrowing environment for urea ($P=0.032$) and creatinine ($P<0.001$). The two-way interaction of parturition induction and birth weight class was significant for lactate ($P=0.046$) and glucose ($P=0.038$). The two-way interaction between the farrowing environment and birth weight class was not significant for any of the analysed plasma metabolites.

Main effects were evaluated via repeated measurements analysis using data from 96 selected piglets (Table 3). The parturition induction impacted the plasma levels of lactate ($P<0.001$), glucose ($P=0.035$) and total protein ($P<0.001$), as well as creatinine ($P=0.009$), ammonia ($P<0.001$), triiodothyronine ($P=0.040$), cortisol ($P=0.031$), sodium ($P<0.001$), and uric acid ($P<0.001$).

The farrowing environment showed effects on the plasma levels of insulin ($P=0.023$), glucose ($P<0.001$), creatinine ($P<0.001$), and cortisol ($P=0.004$). Birth weight class had an effect on the plasma concentrations of insulin ($P=0.047$), glucose ($P=0.002$), inositol ($P<0.001$), NEFA ($P=0.027$), blood urea nitrogen ($P=0.001$), uric acid ($P=0.002$), cortisol ($P=0.032$), and sodium ($P=0.025$). Moreover, a time effect was observed for plasma levels of NEFA ($P=0.016$), triglycerides ($P=0.005$), total protein ($P=0.004$), albumin ($P<0.001$), blood urea nitrogen ($P=0.001$), uric acid ($P<0.001$), cortisol ($P=0.014$), and sodium ($P=0.001$).

Evaluation of plasma metabolites and hormones per time point

The three-way interaction including parturition induction, farrowing environment, and birth weight class was significant for total protein on day 20 ($P=0.014$) and for haptoglobin on day 1 ($P=0.013$). It was also significant for sodium on day 20 ($P=0.015$) and day 29 ($P=0.043$) and for chloride on day 4 ($P=0.013$; Additional Table S1).

A significant two-way interaction between parturition induction and farrowing environment was observed for glucose on day 1 ($P=0.040$) and for total protein on day 20 ($P=0.049$). This interaction was also significant for plasma creatinine levels during the neonatal adaptation period (0.5–6.0 h: $P=0.003$; day 1: $P<0.001$; day 4: $P<0.001$). Significant two-way interactions between parturition induction and farrowing environment were also noted for albumin on day 1 ($P=0.024$) and for blood urea

Table 3 Level of significance for the analysed data of plasma metabolites and hormones due to parturition induction, farrowing environment and birth weight class following the repeated measurements approach. The data were obtained from German Landrace piglets ($n=96$) of different birth weight classes from spontaneous and induced parturitions which born in crates and pens. The analyses include data from 1–5 time points per parameter. Significant effects are highlighted in bold ($P<0.05$)

Item	Parturition induction	Farrowing environment	Birth weight class	Time	I $\times$ F	Number of time points ¹
Albumin	0.265	0.289	0.452	<0.001	0.855	5
Ammonia	<0.001	0.083	0.631	0.324	0.224	5
Chloride	0.173	0.576	0.579	0.091	0.842	5
Cortisol	0.031	0.004	0.032	0.014	0.882	5
Creatinine	0.009	<0.001	0.596	0.051	<0.001	5
Fructose	0.361	0.421	0.077	-	0.182	1
Glucose	0.035	<0.001	0.002	0.248	0.423	3
Haptoglobin	0.480	0.405	0.479	0.112	0.442	5
Inositol	0.889	0.113	<0.001	0.741	0.753	2
Insulin	0.476	0.023	0.047	0.161	0.066	3
Lactate	<0.001	0.488	0.616	0.951	0.529	3
NEFA	0.089	0.495	0.027	0.016	0.661	5
Sodium	<0.001	0.160	0.025	0.001	0.205	5
Total protein	<0.001	0.729	0.051	0.004	0.570	5
Triglycerides	0.265	0.119	0.628	0.005	0.199	5
Triiodothyronine	0.040	0.774	0.453	0.494	0.074	2
Blood urea nitrogen	0.470	0.266	0.001	0.001	0.032	5
Uric acid	<0.001	0.950	0.002	<0.001	0.907	5

¹ Additional Table S2 lists the time points when each parameter was analysed; NEFA – non-esterified fatty acids; I – Parturition induction; F – Farrowing environment

nitrogen at 0.5–6.0 h ($P=0.002$) and on day 20 ($P=0.041$). Additionally, this interaction was significant for sodium levels on day 20 ($P=0.028$; Additional Table S3; Additional Table S4).

Significant two-way interactions were found between parturition induction and birth weight class for glucose ($P=0.020$), haptoglobin ($P=0.0021$), and cortisol ($P=0.027$) on day 1. The interaction was also significant for sodium at the time points 0.5–6.0 h ($P=0.012$), day 20 ($P=0.049$), and day 29 ($P=0.048$).

Significant two-way interactions were found between farrowing environment and birth weight class for inositol on day 1 ($P=0.021$) as well as for total protein at 0.5–6.0 h ($P=0.045$). For haptoglobin, a significant two-way interaction was found on day 1 ($P=0.024$) and day 20 ($P=0.048$). The interaction between the farrowing environment and birth weight class was significant for sodium on day 1 ($P=0.013$), day 20 ($P=0.031$) and day 29 ($P=0.004$), and for chloride on day 4 ($P=0.015$).

As shown in Fig. 1, piglets from spontaneous parturition had 31% lower plasma lactate levels than piglets from hormonally induced parturition on day 4 ($P=0.016$). Compared to piglets from induced parturition, the glucose concentrations of the piglets from spontaneous parturition were significantly lower on day 1 ($P=0.026$) and day 4 ($P=0.10$). Piglets from spontaneous parturition had 19% higher NEFA concentrations compared to piglets from induced parturition on day 4 ($P=0.013$). Total protein concentrations were also elevated in piglets from spontaneous parturition on day 4 ($P=0.004$) and day 20 ($P=0.024$). Blood urea nitrogen concentrations were lower in piglets from spontaneous parturition than in piglets from induced parturition at 0.5–6.0 h of age ($P=0.041$), and were 39% higher on day 20 ($P=0.002$). Piglets from spontaneous parturition had lower creatinine levels at 0.5–6.0 h ($P=0.004$) and higher creatinine levels on day 1 ($P<0.001$) and day 4 ($P<0.001$) than piglets from induced parturition. Ammonia levels were 17% lower in spontaneously born piglets than in piglets from induced parturition on day 1 ($P=0.003$). The plasma uric acid concentrations were 25% higher in piglets born spontaneously compared to piglets from induced parturition at 0.5–6.0 h ($P=0.007$). Haptoglobin levels were 11% lower in piglets from spontaneous parturition on day 1 ($P=0.041$). Spontaneously born piglets had lower plasma sodium concentrations during the neonatal adaptation period than piglets from induced parturition (0.5–6.0 h: $P=0.023$; day 1: $P=0.001$; day 4: $P=0.019$; Additional Table S3; Additional Table S4).

As shown in Fig. 2, piglets born in the pen had 16% lower plasma lactate levels than piglets from a crated dam on day 1 ($P=0.027$). Lower plasma glucose levels were found in piglets in the pen compared to piglets with a crated dam on day 1 ($P=0.006$) and day 4 ($P=0.009$).

Inositol levels were reduced in piglets in the pen compared to piglets with crated dam at 0.5–6.0 h ($P=0.023$) and on day 1 ($P=0.038$). Piglets in the pen had lower triglyceride ($P=0.033$) concentrations and higher urea concentrations ($P=0.016$) than piglets with crated dams at time 0.5–6.0 h. In the pen, piglets had higher plasma creatinine concentrations than piglets with crated dams except for day 20 (0.5–6.0 h: $P=0.003$; day 1: $P<0.001$; day 4: $P<0.001$; day 29: $P<0.001$). Ammonia levels were 20% higher in piglets raised in the pen at day 29 ($P=0.044$). Piglets in the pen had lower plasma sodium levels than piglets with a crated dam on day 1 ($P=0.035$; Additional Table S3; Additional Table S4).

As shown in Fig. 3, hypotrophic piglets had lower plasma glucose concentrations than their non-hypotrophic littermates on day 1 ($P=0.006$) and day 4 ($P=0.009$). NEFA concentrations were 30% higher in hypotrophic piglets than in non-hypotrophic piglets on day 4 ($P=0.023$). Plasma triglyceride levels in hypotrophic piglets were lower than in non-hypotrophic piglets on day 1 ($P=0.035$). Plasma urea levels of hypotrophic piglets were 66% elevated compared to non-hypotrophic piglets on day 4 ($P=0.007$). Cortisol levels were higher in hypotrophic piglets than non-hypotrophic littermates at day 1 ($P=0.013$) and day 4 ($P=0.011$). Sodium levels were lower in hypotrophic piglets compared to non-hypotrophic piglets at 0.5–6.0 h ($P=0.009$) and day 29 ($P=0.005$), and chloride levels were lower at 0.5–6.0 h ($P=0.032$) and on day 4 ($P=0.022$; Additional Table S3; Additional Table S4).

Notable time effects were detected for total protein and triglycerides. The total protein content increased significantly between samplings at 0.5–6.0 h and day 1 ($P<0.001$). Plasma triglycerides increased between day 1 and day 4 ($P<0.001$) and subsequently decreased until day 20 ($P<0.001$).

Discussion

The objective of this study was to investigate the potential influence of farrowing induction and the farrowing environment, i.e. pens or crates, on piglet vitality. For this purpose, general farrowing characteristics were determined and serial analyses of growth and plasma metabolites were performed in piglets of different birth weight classes.

Characteristics of farrowing

Since the duration of farrowing has been shown to influence piglet vitality, particularly regarding the level of hypoxia [30], it is notable that in this experimental setting with 18 litters, neither parturition induction nor farrowing environment affected farrowing duration or intervals between births. This finding is consistent with previous studies, where Boonraungord et al. [15] could

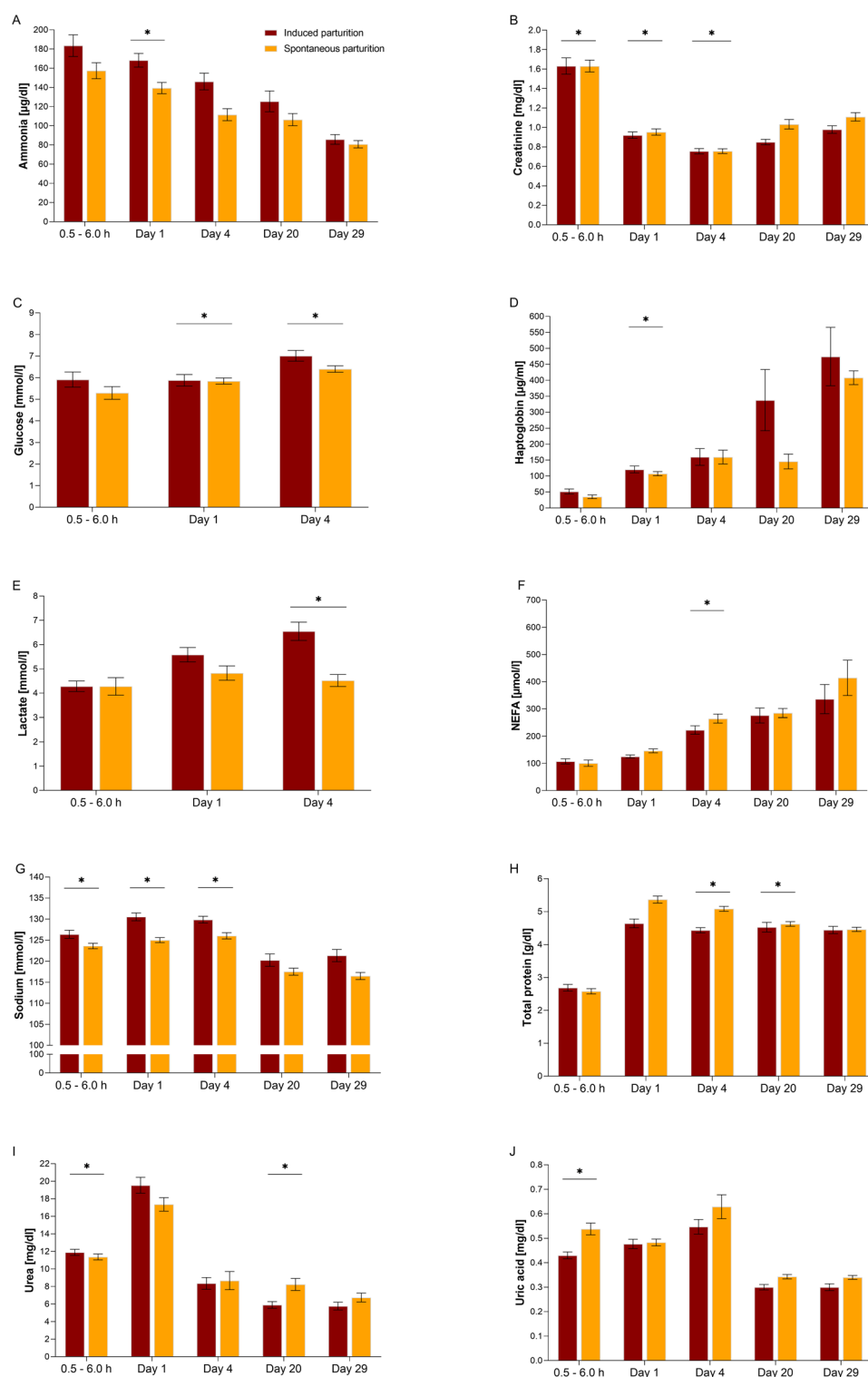


Fig. 1 Effect of induced vs. spontaneous parturition on plasma metabolites in neonatal and suckling piglets. Plasma metabolites exhibiting significant differences for specific time points comprised (A) ammonia, (B) creatinine, (C) glucose, (D) haptoglobin, (E) lactate, (F) NEFA (non-esterified fatty acids), (G) sodium, (H) total protein, (I) blood urea nitrogen, and (J) uric acid. Samples were taken at 0.5–6.0 h, day 1, day 4, day 20, and day 29. Data on induced parturitions also have been analysed in a companion study [29]. Significant differences ($P < 0.05$) are indicated by asterisks

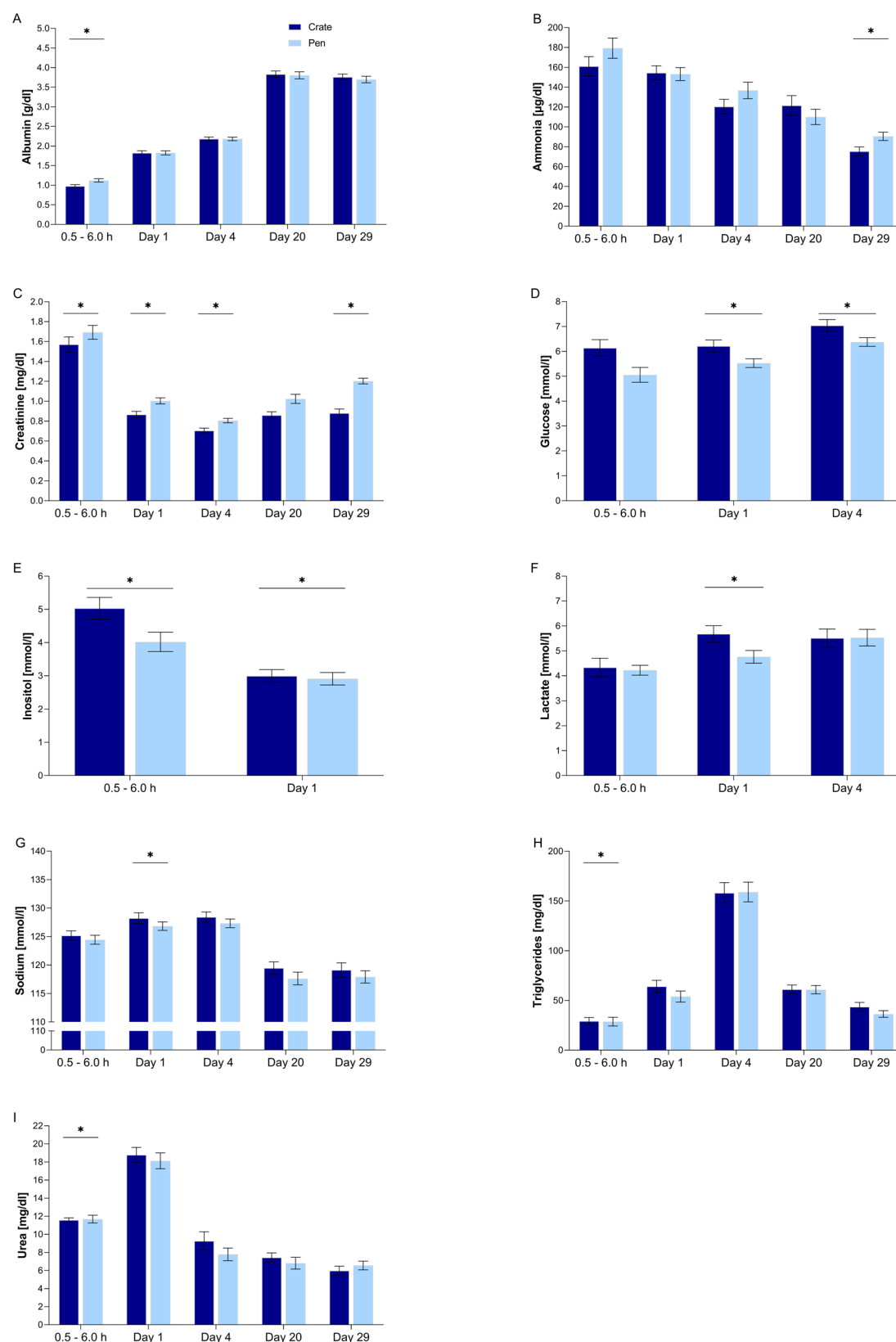


Fig. 2 Effect of farrowing environment, i.e. pens or crates on plasma metabolites in neonatal and suckling piglets. Plasma metabolites exhibiting significant differences for specific time points comprised **(A)** albumin, **(B)** ammonia, **(C)** creatinine, **(D)** glucose, **(E)** inositol, **(F)** lactate, **(G)** sodium, **(H)** triglycerides, and **(I)** blood urea nitrogen. Samples were taken at 0.5–6.0 h, day 1, day 4, day 20, and day 29. Data on parturitions from crates also have been analysed in a companion study [29]. Significant effects ($P < 0.05$) are indicated by asterisks

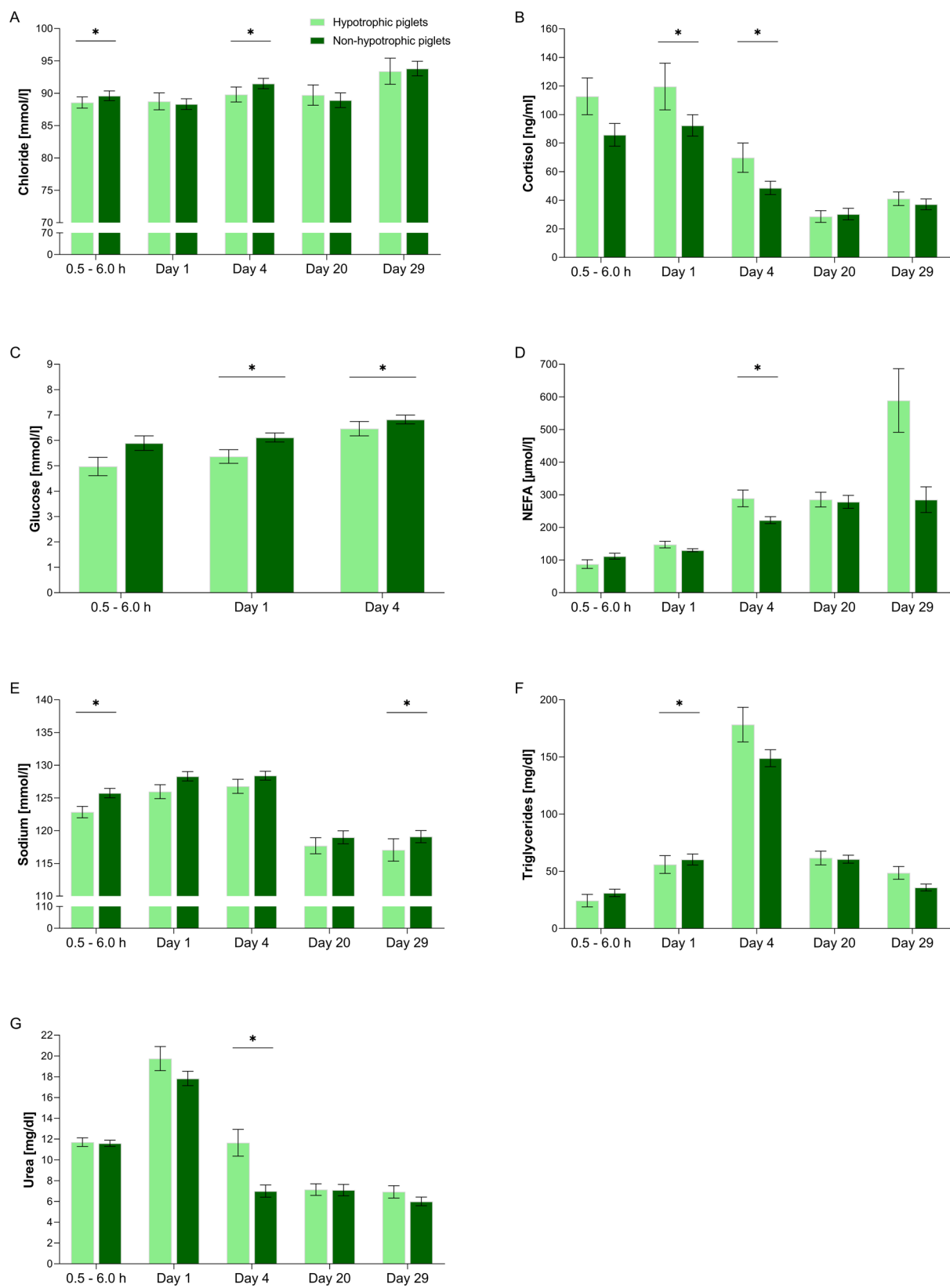


Fig. 3 Effect of birth weight class on plasma metabolites in neonatal and suckling piglets. Plasma metabolites exhibiting significant differences for specific time points comprised **(A)** chloride, **(B)** cortisol, **(C)** glucose, **(D)** NEFA (non-esterified fatty acids), **(E)** sodium, **(F)** triglycerides, and **(G)** blood urea nitrogen. Samples were taken at 0.5–6.0 h, day 1, day 4, day 20, and day 29. Significant effects ($P < 0.05$) are indicated by asterisks

not detect an effect of parturition induction and Peder- sen et al. [23] could not determine an influence of the far- rowing environment on the inter-farrowing intervals and farrowing duration. However, other studies indicated a shorter farrowing duration due to parturition induction [31, 32]. The relatively high stillbirth rate in the induced parturitions from farrowing pens is noteworthy. The rea- sons for this cannot be attributed to farrowing duration, dystocia rate, sow conditions, and management practices (e.g. ambient temperature), as these did not show any abnormalities. Vitality immediately after birth is critical for survival, as it impacts the time to first suckling, with shorter times indicating stronger and more vital piglets. This might be reflected in the numerically lower pre- weaning mortality of spontaneous parturitions compared to induced parturitions in pens. Additionally, Boon- raungrod et al. [15] reported a detrimental impact of car- betocin on the ability of newborn piglets to suckle within the initial 24-hour postnatal period. Furthermore, car- betocin may reduce the quantity of colostrum produced [15]. In addition to the adverse effects described, in the current study the time to first suckling was also signifi- cantly prolonged by parturition induction with PGF_{2α} and carbetocin compared to spontaneous parturitions.

All piglets experienced a drop in body temperature at birth. However, spontaneously born piglets appeared to regulate their body temperature more rapidly, as evi- denced by higher rectal temperatures at day 1 (24 h) of life compared to piglets from induced parturitions. The more effective adaptation of thermoregulation indicates a higher vitality, which could also be expressed in a shorter time to first suckling. This finding aligns with the results of Boonraungrod et al. [15], who also observed higher rectal temperatures in spontaneously born piglets com- pared to those born via induced delivery at 24 h *postpar- tum*. There is a positive correlation between birth weight and rectal temperature shortly after birth, likely due to the less favourable surface-to-volume ratio in hypotro- phic piglets [33]. However, if these piglets can success- fully regulate their body temperature by day 1 of age, they are more likely to survive the suckling period. The pre-weaning mortality rates were not affected by the far- rowing environment in this experimental setting with 18 litters, consistent with the findings of Kilbride et al. [11].

Body weight development

The impact of parturition induction on weaning weight is inconsistent across studies [18, 34, 35], suggesting additional interacting factors such as nutrition, fat mobi- lization, microbial colonization, or health status (e.g. *postpartum* dysgalactia syndrome prevalence) during the suckling period in sows and piglets. In our study, there was no significant association between body weight and farrowing environment, except at day 20. In the same

way, there was no significant relationship with the pro- portion of hypo-, eu-, or hypertrophic piglets, which is consistent with previous research findings [36]. This indi- cates that nutrient intake by piglets is maintained regard- less of the sow's freedom of movement. However, piglets with low birth weight were unable to compensate for the weight difference until shortly after weaning, regardless of parturition induction and farrowing environment, a phenomenon observed already in other studies [37–39].

Effect of parturition induction

Approximately ten hours after birth, piglets' endogenous glycogen reserves are depleted [40]. To meet their nutri- tional requirements, piglets must therefore engage in glu- coneogenesis. In this study, piglets born spontaneously exhibited lower plasma concentrations of glucose and lactate during the initial four-day period compared to piglets born via induced delivery. The lower plasma glu- cose values suggest a higher glucose turnover, while the lower lactate values suggest the possibility of increased gluconeogenesis. Lower plasma glucose levels in piglets from non-induced parturitions were similarly observed by Sanchez-Aparicio et al. [41] when measured directly after birth. In the current study, the differences in the first measurements *postnatum* (0.5–6.0 h) were numerical but not statistically significant. One possible explanation could be that the first intake of colostrum before sam- pling masked these effects. In addition to carbohydrates, energy is also obtained from lipids via mobilization of energy reserves. The higher NEFA values in spontane- ously born piglets on day 4 might support the assump- tion for a higher energy requirement compared to piglets from induced births. In contrast, the results could be due to a potentially increased intake of colostrum in pigs from non-induced sows, as these pigs have suckled ear- lier and a higher intake is to be expected. The observed overall increase in total protein concentration on day 1, along with the survival of the suckling period, provides evidence that the piglets had sufficient colostrum inges- tion and absorption. Indeed, most colostrum proteins are highly digestible [42] and IgG serves as major component of colostrum proteins ultimately elevating plasma total protein concentration in neonates [3, 43]. The total pro- tein levels were found to be higher in spontaneously born piglets on day 4 and 20, which might indicate differences in protein turnover. The elevated blood urea nitrogen lev- els observed in spontaneously born piglets on day 20 may be attributed to an assumed increased protein turnover. It is similarly conceivable that piglets from spontaneous parturitions employed less protein for energy production during the neonatal adaptation phase, resulting in lower ammonia levels and higher total protein concentrations on day 1. In fact, metabolic and endocrine drivers do not necessarily peak at the same time due to differences in

responsiveness to external cues (e.g., suckling time) and intrinsic circadian regulation. Lower ammonia levels have also been observed when protein is used to build lean muscle mass [44]. Increased plasma uric acid concentrations shortly after birth have been associated with hypoxia [45]. Piglets from spontaneous parturitions also have higher plasma uric acid levels than piglets born by caesarean Sect. [46]. However, the piglets from spontaneous parturitions in the current study are unlikely to have been hypoxic, as the lactate levels do not differ from piglets from induced parturitions. This is supported by the study by Wehrend et al. [47], who did not find any difference in the blood pH level of piglets from induced and spontaneous parturition immediately after delivery. As the kidneys are not fully developed [48], there may be certain difficulties with both sodium reabsorption and excretion [49]. The lower sodium levels of the spontaneous group during the neonatal adaptation phase may therefore be due to adaptation processes. The differences in creatinine levels between piglets born from spontaneous parturition and those from induced parturition can be attributed to metabolic activity and renal clearance. Piglets born through spontaneous parturition may experience more active muscle contractions during delivery, leading to higher creatinine production initially. By day 1, induced piglets might catch up as they begin normal postnatal muscle activity. Lower haptoglobin concentrations were found in piglets born by spontaneous delivery compared to induced parturitions. Haptoglobin is absorbed with the colostrum of piglets and stimulates its endogenous genesis [50, 51]. There should be no significant response to external stressors at this age [52] and an increase in plasma haptoglobin concentration in the first week of life has been interpreted as a strategy for surviving this critical life phase [53]. In this context, haptoglobin has been suggested to play a crucial role for haemoglobin recycling and iron conservation as reviewed elsewhere [54, 55].

Impact of the farrowing environment

Results revealed differences in lactate concentrations due to the applied farrowing environment, indicating increased gluconeogenesis in pen-born piglets (day 1). The latter is consistent with findings from Devillers et al. [3], who concluded a higher energy requirement for pen-born piglets during the neonatal period. The assumption for a high energy requirement might be also supported by the lower plasma glucose values in pen-housed piglets compared to those with a crated dam on day 1 in this study. In contrast, Nowland et al. [56] reported higher blood glucose levels one day *postpartum* in piglets born in farrowing pens compared to those born in gestation crates, which they attributed to higher energy intake. However, neither the two studies cited, nor the

current study, state how much time elapsed between the last suckling and blood sampling. It is known from human medicine that the plasma inositol level in newborn infants is high, e.g. due to neural development, and rapidly declines in the first days of life to reach baseline levels [57]. The lower inositol levels in piglets in pens compared to those with a crated dam might suggest a slightly higher efficiency in renal elimination. There are also differences in protein and nitrogen metabolism depending on whether the mothers are kept in a pen or a crate. In the first few days, the piglets use proteins for energy synthesis, whereby urea is formed [58]. Higher blood urea nitrogen concentrations in piglets from the pen group indicate a higher protein turnover in the first hours of life. In addition, an assumed higher physical activity of piglets from sows kept in pens not only leads to higher energy requirements from carbohydrates, fat and protein metabolism, but also to higher creatinine concentrations [59], similar to our results.

Effect of birth weight class

Hypotrophic piglets have a relatively higher energy requirement per kg body weight due to their less favourable surface-to-volume ratio compared to their normal-weight counterparts [33]. This was reflected in the lower glucose concentrations on day 1 and day 4. In addition, hypotrophic piglets may have absorbed less nutrients [60], as the milk composition varies between the individual teats [61] and there is also teat competition in the first few days of life [62, 63]. The individual teat order was not recorded in this study. Furthermore, the hypotrophic piglets exhibited low glucose concentrations which might have led to an increased glucose mobilization via counter-regulatory hormones such as cortisol. Cortisol also has a catabolic effect, which results in higher energy consumption and the mobilization of energy reserves. However, in another study no marked differences in cortisol response were observed during hypoglycemic clamps in pigs [64]. Additionally, cortisol is known to play a crucial role in promoting surfactant production and lung maturation in neonatal pigs, and low birth weight piglets may have different cortisol dynamics compared to their normal birth weight counterparts. Colostrum intake is significantly dependent of the birth weight class [60]. Therefore, the low birth weight piglets have a smaller amount of nutrients at their disposal. In catabolic conditions, lipids are also mobilized. This may be a reason for higher NEFA levels on day 4. At the same time, there is a high demand for energy, while low endogenous energy reserves are available in hypotrophic piglets [65]. In addition, differences in the maturation state of pancreas are conceivable, which might lead to an accumulation of NEFA in the plasma [66].

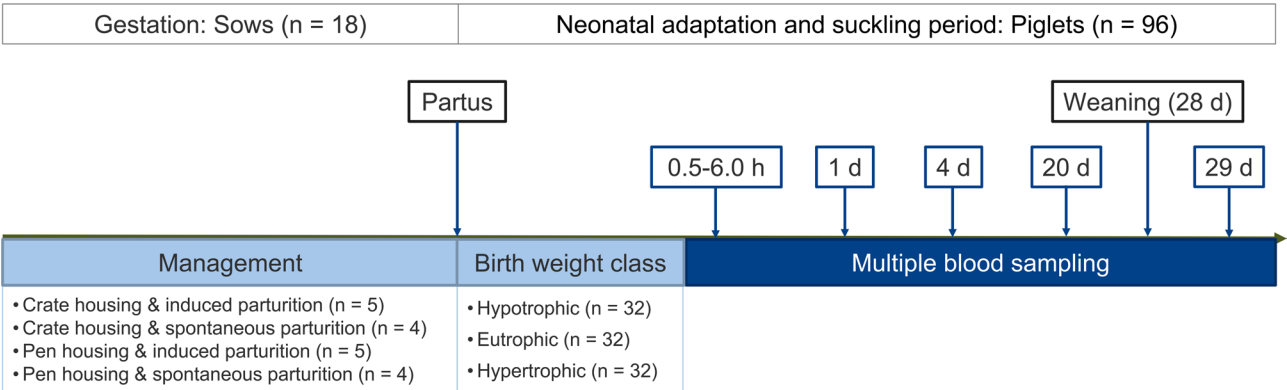


Fig. 4 Experimental design to evaluate piglet’s metabolism due to farrowing environment, parturition induction, and birth weight class. Multiparous German Landrace (GL) sows were subjected to farrow in two different farrowing environments, i.e., crate or pen ($n=9$ each). A subset of sows (crate: $n=5$, pen: $n=5$) underwent induced parturition, while another subset (crate: $n=4$, pen: $n=4$) experienced spontaneous farrowing. In total, $n=283$ piglets were classified according to birth weight as hypotrophic (800–1100 g), eutrophic (> 1100–1500 g), and hypertrophic (> 1500 g). Of these, $n=96$ piglets were selected for repeated blood analyses during the entire suckling period. Piglets from induced parturitions have also been implemented in a companion study [29]

In this study, the selected hypotrophic piglets appeared to be sufficiently developed to survive, as the fructose levels did not differ from those of the non-hypotrophic piglets [1, 67, 68]. Higher plasma concentrations of blood urea nitrogen as a product of protein deamination occur in hypotrophic piglets if the proteins are used to cover energy requirements rather than for the accretion of lean muscle tissue [69, 70]. Therefore, Decaluwé et al. [71] also reports a negative correlation between plasma urea levels and daily weight gain.

Hypotrophic piglets had lower plasma sodium levels than the non-hypotrophic piglets a few hours *postnatum*. As blood electrolytes are tightly regulated, results indicate that kidney function is not yet developed, leading to a reduced ability to regulate and retain sodium. The sodium levels are also lower in the hypotrophic piglets than in the non-hypotrophic piglets one day after weaning. This is probably associated with the acid-base balance [1]. This underlines the importance of appropriate nutritional and management strategies to promote the health and growth of low weight piglets during the neonatal adaptation period and beyond.

Notably, this study was carried out on a limited number of plasma sampling time points to cover important adaptation processes of neonates and suckling piglets. This may have resulted in certain dynamic changes in metabolite profiles during neonatal adaptation and lactation remaining unrecognized.

Methods

Farrowing environment, parturition induction, and management

The study was based on 96 extensively examined piglets from a total of 18 German Landrace sows (GL) of parities two to six as part of a larger study [29]. All animals were

owned by the Research Institute of Farm Animal Biology (FBN) and were reared and housed in its Experimental Swine Facilities. All sows were artificially inseminated and kept in groups until they were moved to farrowing units at 105 days *post-conceptionem* (dpc). The sows were allocated randomly to four treatment groups based on their farrowing environment and nature of parturition onset: (i) Crate-housed with induced parturition, (ii) crate-housed with spontaneous parturition, (iii) pen-housed with induced parturition, and (iv) pen-housed with spontaneous parturition (Fig. 4). In detail, sows were placed in crates ($n=9$) or pens ($n=9$) on day 114 of gestation. On day 114 of gestation, farrowing induction was performed on five sows in each of the two farrowing environments (crate: $n=5$; pen: $n=5$). Parturition was induced with a standard regimen of prostaglandin $F_{2\alpha}$ (PGF) and carbetocin. Specifically, 0.175 mg cloprostenol (2 ml PGF Veyx forte®; Veyx, Schwarzenborn, Germany) was injected intramuscularly on gestation day 114. Furthermore, the respective sows received 70 µg carbetocin (1 ml Depotocin®; Veyx, Schwarzenborn, Germany) intramuscularly on gestation day 115 (24 h after PGF). The piglets obtained from the induced parturitions were previously analysed [29] and now serve as a reference group in the present study. In addition, two experimental groups did not receive hormonal parturition induction to represent spontaneous, non-induced birth conditions (crate: $n=4$; pen: $n=4$).

Both farrowing environments had a total floor area of 6.5 m². In the crate system, the crate was closed for five consecutive days starting one day before expected farrowing. The area available to the sows was limited to 180×60–70 cm in the crate system. In the pen system, the sows had access to the entire 6.5 m² area (325×200 cm), except for the creep area. In both

farrowing environments, a heating plate (76 × 60 cm) and a heat lamp (creep area temperature 30 °C) were provided for the piglets in the creep area. The temperature in the farrowing pens was set at 22 °C and computer-controlled along with the ventilation.

At 109 dpc, the sows were transitioned from a commercial gestation diet (12.2 MJ of metabolizable energy (ME), 3.2 kg/d; Additional Table S5) to a commercial lactation diet (13.2 ME, 3.2 kg/d), which was subsequently reduced to 2 kg/d at 112 dpc. Following farrowing, the quantity was augmented to a maximum of 8 kg at mid-lactation, contingent on individual requirements. Water was available *ad libitum* to all animals via one drinker per farrowing unit.

Supervision of sows and piglets

The periparturition period was monitored personally for all sows. The parturition was defined as the time between the first and the last piglet being born. In the case that the inter-farrowing interval exceeded 60 min, manual obstetrics was performed without the administration of hormones.

The number of live-born piglets, stillborn piglets, and mummified piglets was recorded per litter. The individual time of parturition was recorded for each piglet and inter-farrowing intervals were calculated. Piglet vitality was scored based on Zaleski and Hacker (1993) [72]. For breathing, skin colour, standing attempts, and meconium staining, scores with the levels 0, 1, or 2 were assigned for each parameter. This resulted in vitality scores that ranged between 0 (death) and 8 (best) as described previously [29]. Due to visual inspection, the time to first suckling was recorded for each neonatal piglet. The individual body weight of all piglets was determined after their first suckling event using a digital scale (Kern & Sohn, Balingen, Germany). Body weight of the selected piglets was also determined on day 1 (24 h), day 4, day 20 and day 29. The rectal body temperature was measured (Microlife VT 1831; Mikrolife, Effretikon, Switzerland) after colostrum intake and on day 1 (24 h). Piglet mortality was recorded daily during suckling period.

The management of neonatal and suckling piglets followed the procedure described previously [29]. In brief, piglets were marked with individual tattoo numbers on the first day of life. The piglets received an oral iron and vitamin application (PUCORAL® FerroPlus, Pulte GmbH & Co. KG, Germany) on the first day of life (1 ml per piglet) and an iron-injection (Ursoferran® 100 mg/ml, Serumwerk Bernburg, Germany) on day 14 of life (2 ml per piglet). The piglets were fed a pre-starter (Hakra-Immuno-G, 15.2 MJ ME/kg, 18.8% CP, Una Hakra) *ad libitum* via an automatic feeder from 14 days of life. They were vaccinated against *Lawsonia intracellularis* (ENTERISOL® ILEITIS, Boehringer Ingelheim Vetmedica

GmbH, Germany) at three weeks of age. Piglets from spontaneous parturitions were weaned at 27.8 ± 0.5 days of life (induced parturitions: 28 days of life).

Piglet selection

Results on a subgroup of piglets, i.e., induced parturitions, have been presented previously [29] and now serve as a reference group in the present study. After first suckling, the piglets were classified by body weight ($n = 283$). The applied weight classes were based on the stock percentiles of 13,755 neonatal piglets from the FBN experimental station (FBN, unpublished data). Piglets with initial body weight < 1100 g were defined as hypotrophic (lowest quartile), from 1100 to 1500 g as eutrophic, and > 1500 g as hypertrophic (highest quartile). To minimize effects from intrauterine growth retardation (IUGR), a cut-off was applied at a birth weight < 800 g for selecting piglets sampled over the suckling period, i.e., piglets weighing < 800 g were excluded from the metabolite profiling. In each of the four experimental sow groups, eight piglets per body weight class were selected randomly from 4 to 5 litters ($n = 96$) for monitoring and repeated blood sampling throughout the suckling period (Fig. 4).

Repeated blood collection of piglets

Blood samples were collected from the 96 selected piglets (2 induction protocols × 2 farrowing environments × 3 birth weight classes × 8 biological replicates) via the vena jugularis after the first suckling between 0.5 and 6.0 h of age, with precise time of collection recorded. Additional blood samples were taken at day 1 (24 h) and day 4 to cover the neonatal adaptation phase (Fig. 4). The blood samples taken at day 20 and day 29 were supposed to reflect the effects of organ maturation and weaning. Blood samples were collected using K-EDTA tubes (Sarstedt, Nümbrecht, Germany). EDTA samples were placed on ice and centrifuged (4 °C, 3500 rpm, 15 min). Retrieved plasma was stored at -80 °C until analysis.

Physiologic parameters, hormones and metabolites

As a follow up to our recent publication [29], a number of plasma metabolites was analysed using commercially available kits, including total protein, albumin, blood urea nitrogen, creatinine, ammonia, triglycerides, uric acid, sodium, and chloride (FUJI Dri-Chem 4000i, Fuji-Film, Minato, Japan). Plasma concentrations of fructose, glucose, inositol, and lactate were measured by HPLC (Agilent, Waldbronn, Germany) as previously described [73]. In brief, these metabolites were determined after protein precipitation with 30 µl plasma and 20 µl 1.5 M perchloric acid and neutralization with 10 µl 2 M K₂CO₃ and centrifuged (4 °C, 50.000 g rpm, 20 min). Plasma levels of non-esterified fatty acids (NEFA) were determined with a commercial device (ABX Pentra C400, HORIBA

Medical, Montpellier, France) with enzyme-based kits (WAKO Chemicals GmbH, Neuss, Germany). Plasma haptoglobin (cat.-no. HAPT-9, Life Diagnostics, Inc., West Chester, Pennsylvania, USA), cortisol (cat.-no. EIA-1887, DRG Diagnostics GmbH, Marburg, Germany), insulin (cat.-no. EIA-4747, DRG Diagnostics GmbH), and total triiodothyronine (cat.-no. EIA-4569, DRG Diagnostics GmbH) were measured in duplicate via ELISAs according to the manufacturer's protocol.

An adequate number of animals was used (effect size: Cohen's $f=0.3$; power: 80%; maximum error: 5%), and only limited volumes of blood were repeatedly sampled. Consequently, not all parameters could be measured at every time point due to the limited availability of plasma. An overview of the respective plasma parameters determined per time point is shown in Additional Table S2.

Statistical analyses

Regarding farrowing traits (e.g. farrowing duration, litter size), the litter was the experimental unit. Data was analysed using a two-way ANOVA taking into account the farrowing environment and the parturition induction as fixed effects (R language v4.2.2; R package 'car', v3.1-1; R foundation for statistical computing, Vienna, Austria). The Tukey post-hoc test was used for pairwise comparisons between experimental piglet groups. Based on previously published results of the project [29], eutrophic and hypertrophic piglets were grouped together as non-hypotrophic piglets for the statistical analyses. A chi-square test was performed to test whether there is an influence of birth weight class on pre-weaning mortality.

The individual piglet was the experimental unit for analyses of the plasma metabolites. A rank-based inverse normal transformation was applied as raw data showed deviation from normal distribution (R package 'RNOmni', v1.0.1.2). In a repeated measurements approach, the individual animal was considered and the effects of parturition induction, farrowing environment, birth weight class, and time as fixed effects as well as the respective two-way and three-way interactions were analysed (R package 'stats').

Additionally, observations at each individual time point were evaluated via a linear model with parturition induction, farrowing environment, and birth weight class as fixed effects as well as their respective two-way and three-way interactions (R package 'stats'). In order to evaluate possible time effects on the total plasma protein (0.5–6.0 h vs. day 1) and plasma triglyceride levels (day 1 vs. day 4 vs. day 20), the linear model included the effect of sampling time point. The difference between age at sampling and first colostrum intake, showing the individual duration for digestion of macronutrients, was considered as covariate for calculations related to the initial sampling time point (0.5–6.0 h). The pairwise

comparison of the mean values between experimental groups was carried out using the Tukey post-hoc test. The significance level was set at $P<0.05$. All results were presented as mean $\pm$ SEM.

Conclusion

Compared to piglets from induced parturitions, piglets from spontaneous parturitions appear to be more mature and utilise nutrients more effectively. Metabolic differences between piglets in pens and piglets with a crated dam indicate changes in energy metabolism and physical activity. Hypotrophic piglets showed clear metabolic changes compared to heavier littermates in order to mobilise energy resources in the first few days of life. Sow management, including farrowing environment and the nature of parturition onset, plays a crucial role in improving piglet metabolism and should be individualised. By challenging the routine use of parturition induction and investing in more labor-intensive, individualized management practices, pig farmers could improve both piglet maturity and vitality.

Abbreviations

Dpc	Days post-conceptionem
I	Parturition induction
F	Farrowing environment
ME	Metabolizable energy

Supplementary Information

The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.1186/s12917-025-04845-2>.

Supplementary Material 1
Supplementary Material 2
Supplementary Material 3
Supplementary Material 4
Supplementary Material 5

Acknowledgements

The authors acknowledge Angela Garve, Gina Fiedler, Leon Borowski, Tina Illner, Magdalena Rudkowska, Sonja Uplegger, Kirsten Karpati, and Susanne Dwars for their excellent technical assistance. The authors would like to thank Benjamin Diehl, Adewunmi O. Omotoso and Maruf Hasan as well as the staff of the Experimental Swine Facility at FBN.

Author contributions

Conceptualization: MO, AV, HB, KW; Data curation: HL, MO, AV, HR, SG; Formal analysis: HL, MO; Funding acquisition: MO, AV, HB, KW; Investigation: HL, MO, AV, HR, EM, SG, CCM, HB, KW; Methodology: HL, MO, AV, SG; Project administration: HL, HB, KW; Supervision: HB, KW; Visualization: HL, MO; Roles/ Writing - original draft: HL, MO, HR; and Writing - review & editing: HL, MO, AV, HR, EM, SG, CCM, HB, KW;

Funding

Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL. The project is funded by Tönnies Forschung GmbH.

Data availability

Part of the data generated or analysed is contained in this published article [31]. The data that support the study findings are available from the authors upon request.

Declarations

Ethics approval and consent to participate

The study was conducted in accordance with the German Animal Welfare Act and approved by the Animal Welfare Committee of the FBN. The study was approved by the Ethics Committee of the State of Mecklenburg-Vorpommern, Germany (LALLF M-V/TSD/7221.3-1-030/21).

Consent to participate

Not applicable.

Consent for publication

Not applicable.

Competing interests

The authors declare no competing interests.

Author details

¹Research Institute for Farm Animal Biology (FBN), 18196 Dummerstorf, Germany

²Veterinary Clinic for Reproductive Medicine and Neonatology, Justus-Liebig-University Gießen, 35392 Gießen, Germany

³Chair of Animal Breeding and Genetics, Faculty of Agricultural and Environmental Sciences, University Rostock, 18059 Rostock, Germany

Received: 28 January 2025 / Accepted: 21 May 2025

Published online: 07 June 2025

References

- Diehl B, Oster M, Vernunft A, Wimmers K, Bostedt H. Intrinsic challenges of neonatal adaptation in swine. *Arch Anim Breed*. 2022;65(4):427–38.
- De Meyer D, Amalraj A, Van Limbergen T, Fockede M, Edwards S, Moustsen V, Chantziaras I, Maes D. Effect of positive handling of sows on litter performance and pre-weaning piglet mortality. *Animal*. 2020;14(8):1733–9.
- Devillers N, Le Dividich J, Prunier A. Influence of colostrum intake on piglet survival and immunity. *Animal*. 2011;5(10):1605–12.
- Le Dividich J, Charneca R, Thomas F. Relationship between birth order, birth weight, colostrum intake, acquisition of passive immunity and pre-weaning mortality of piglets. *Span J Agricultural Res*. 2017;15(2):e0603.
- Baxter E, Jarvis S, D'earth R, Ross D, Robson S, Farish M, Nevison I, Lawrence A, Edwards S. Investigating the behavioural and physiological indicators of neonatal survival in pigs. *Theriogenology*. 2008;69(6):773–83.
- Gladbach C. Untersuchungen über den Einfluss der Gen-Umwelt-Interaktion auf klinische, Endokrinologische und metabolische Parameter im Verlauf der Geburt bei einer Schweinerobustrasse (Angler Sattelschwein) und einer modernen reproduktiv leistungsstarken Schweinerasse. Deutsche Landrasse: VVB Laufersweiler; 2022.
- Baude B-M, Krugmann K, Diers S, Tholen E, Krieter J. Short-term fixation of sows in farrowing pens using different opening procedures. *Livest Sci*. 2022;264:105051.
- Hales J, Moustsen VA, Nielsen MB, Hansen CF. Higher preweaning mortality in free farrowing pens compared with farrowing crates in three commercial pig farms. *Animal*. 2014;8(1):113–20.
- Nicolaisen T, Lühken E, Volkmann N, Rohn K, Kemper N, Fels M. The effect of sows' and piglets' behaviour on piglet crushing patterns in two different farrowing pen systems. *Animals*. 2019;9(8):538.
- Dummiem N, Boonprakob R, Parsons TD, Tummaruk P. Pen versus crate: a comparative study on the effects of different farrowing systems on farrowing performance, colostrum yield and piglet preweaning mortality in sows under tropical conditions. *Animals*. 2023;13(2):233.
- Kilbride AL, Mendl M, Statham P, Held S, Harris M, Cooper S, Green LE. A cohort study of preweaning piglet mortality and farrowing accommodation on 112 commercial pig farms in England. *Prev Vet Med*. 2012;104(3–4):281–91.
- Mainau E, Dalmau A, Ruiz-de-la-Torre J, Manteca X. A behavioural scale to measure ease of farrowing in sows. *Theriogenology*. 2010;74(7):1279–87.
- Zaremba W, Udluft T, Failing K, Bostedt H. Analysis of the course of birth and the early postpartal period in pigs after hormonal partus induction with special consideration of complication rate. *Anim Veterinary Sci*. 2019;7:29–39.
- Decaluwé R, Janssens G, Englebienne M, Maes D. Effectiveness of different farrowing induction protocols in sows using alphaprostol on day 114 of gestation. *Vet Rec*. 2014;174(15):381–381.
- Boonraungrod N, Sutthiya N, Kumwan P, Tossakui P, Nuntapaitoon M, Muns R, Tummaruk P. Control of parturition in swine using PGF_{2α} in combination with Carbetocin. *Livest Sci*. 2018;214:1–8.
- Nam NH, Sukon P. Incidence of dystocia at piglet level in cloprostenol-induced farrowings and associated risk factors. *Arch Anim Breed*. 2022;65(1):97–103.
- Ison SH, Jarvis S, Rutherford KMD. A survey of Sow management at farrowing in the UK. *Anim Welf*. 2016;25(3):309–17.
- Monteiro MS, Muro BB, Poor AP, Leal DF, Carnevale RF, Shiroma MP, Almond GW, Garbossa CA, Moreno AM, Viana CH. Effects of farrowing induction with prostaglandins on farrowing traits and piglet performance: A systematic review and meta-analysis. *Theriogenology*. 2022;180:1–16.
- Blim SM. Über Das geburtsgeschehen Bei schweinen einer hochproliferativen Linie unter verschiedenen haltungsbedingungen: quantifizierung der partusrelevanten belastung Anhand klinischer, stoffwechselbezogener und ethologischer parameter. Universitätsbibliothek; 2020.
- Panzardi A, Bernardi M, Mellagi A, Bierhals T, Bortolozzo F, Wentz I. Newborn piglet traits associated with survival and growth performance until weaning. *Prev Vet Med*. 2013;110(2):206–13.
- König NL, Wähner M, Seeger J, Sigmarsson HL, Kauffold J. An investigation into uterine capacity based on litter and placental characteristics in two Sow lines with different prolificacy (Danish landrace X Danish Yorkshire versus German Saddleback). *Reprod Domest Anim*. 2021;56(1):34–45.
- Zhang Y, Lai J, Wang X, Li M, Zhang Y, Ji C, Chen Q, Lu S. Genome-wide single nucleotide polymorphism (SNP) data reveal potential candidate genes for litter traits in a Yorkshire pig population. *Arch Anim Breed*. 2023;66(4):357–68.
- Pedersen L, Berg P, Jørgensen G, Andersen I. Neonatal piglet traits of importance for survival in crates and indoor pens. *J Anim Sci*. 2011;89(4):1207–18.
- Devillers N, Farmer C, Le Dividich J, Prunier A. Variability of colostrum yield and colostrum intake in pigs. *Animal*. 2007;1(7):1033–41.
- Kammersgaard TS, Pedersen LJ, Jørgensen E. Hypothermia in neonatal piglets: interactions and causes of individual differences. *J Anim Sci*. 2011;89(7):2073–85.
- Noblet J, Etienne M, Blanchard A, Fillaut M, Meziere N, Vachot C, Dubois S. Body composition, metabolic rate and utilization of milk nutrients in suckling piglets. *Reprod Nutr Dev*. 1987;27(4):829–39.
- Andersen IL, Nævdal E, Bøe KE. Maternal investment, sibling competition, and offspring survival with increasing litter size and parity in pigs (*Sus scrofa*). *Behav Ecol Sociobiol*. 2011;65(6):1159–67.
- Bauer R, Walter B, Brandl U. Intrauterine growth restriction improves cerebral O₂ utilization during hypercapnic hypoxia in newborn piglets. *J Physiol*. 2007;584(2):693–704.
- Lickfett H, Oster M, Vernunft A, Reyer H, Görs S, Metges C, Bostedt H, Wimmers K. Influence of genotype and environment on piglet vitality and metabolic state during the suckling period of divergent birth weight classes. *animal*. 2025:101460.
- Langendijk P, Plush K. Parturition and its relationship with stillbirths and asphyxiated piglets. *Animals*. 2019;9(11):885.
- King R, Baxter E, Matheson S, Edwards S. Consistency is key: interactions of current and previous farrowing system on litter size and piglet mortality. *Animal*. 2019;13(1):180–8.
- Hill SV, del Rocio Amezcua M, Ribeiro ES, O'Sullivan TL, Friendship RM. Defining the effect of Oxytocin use in farrowing sows on stillbirth rate: A systematic review with a meta-analysis. *Animals*. 2022;12(14):1795.
- Herpin P, Damon M, Le Dividich J. Development of thermoregulation and neonatal survival in pigs. *Livest Prod Sci*. 2002;78(1):25–45.
- Vallet JL, Miles JR. The effect of farrowing induction on colostrum and piglet serum immunocrits is dependent on parity. *J Anim Sci*. 2017;95(2):688–96.
- Nguyen K, Cassar G, Friendship R, Dewey C, Farzan A, Kirkwood R. Stillbirth and preweaning mortality in litters of sows induced to Farrow with supervision compared to litters of naturally Farrowing sows with minimal supervision. *J Swine Health Prod*. 2011;19(4):214–7.

36. Hutten F, Lundeheim N, Dalin A-M, Einarsson S. Pre-and post-weaning piglet performance, Sow food intake and change in backfat thickness in a group-housing system for lactating Sows. *Acta Vet Scand*. 1997;38:119–33.
37. Škorjanc D, Brus M, Čandek Potokar M. Effect of birth weight and sex on pre-weaning growth rate of piglets. *Arch Anim Breed*. 2007;50(5):476–86.
38. López-Vergé S, Gasa J, Farré M, Coma J, Bonet J, Solà-Oriol D. Potential risk factors related to pig body weight variability from birth to slaughter in commercial conditions. *Transl Anim Sci*. 2018;2(4):383–95.
39. Vodolazska D, Feyera T, Lauridsen C. The impact of birth weight, birth order, birth asphyxia, and colostrum intake per se on growth and immunity of the suckling piglets. *Sci Rep*. 2023;13(1):8057.
40. Mota-Rojas D, Orozco-Gregorio H, Villanueva-Garcia D, Bonilla-Jaime H, Suarez-Bonilla X, Hernandez-Gonzalez R, Roldan-Santiago P, Trujillo-Ortega M. Foetal and neonatal energy metabolism in pigs and humans: a review. *Vet Med (Praha)*. 2011;56(5):215–25.
41. Sanchez-Aparicio P, Mota-Rojas DD, Trujillo-Ortega M, Zarco-Quintero L, Becerril-Herrera M, Alonso-Spilsbury M, Alfaro-Rodriguez A. Effect of prostaglandins for inducing birth on weight, vitality and physiological response in newborn pigs. *J Appl Anim Res*. 2009;36(1):113–8.
42. Lin C, Mahan D, Wu G, Kim SW. Protein digestibility of Porcine colostrum by neonatal pigs. *Livest Sci*. 2009;121(2–3):182–6.
43. Cabrera RA, Lin X, Campbell JM, Moeser AJ, Odle J. Influence of birth order, birth weight, colostrum and serum Immunoglobulin G on neonatal piglet survival. *J Anim Sci Biotechnol*. 2012;3:1–10.
44. Ji Y, Wu Z, Dai Z, Wang X, Li J, Wang B, Wu G. Fetal and neonatal programming of postnatal growth and feed efficiency in swine. *J Anim Sci Biotechnol*. 2017;8:1–15.
45. Poulsen JP, Øyasæter S, Sanderud J, Rognum TO, Saugstad OD. Hypoxanthine, Xanthine, and uric acid concentrations in the cerebrospinal fluid, plasma, and urine of hypoxemic pigs. *Pediatr Res*. 1990;28(5):477–81.
46. Chong J, Wang J, Zhong H, Zhang J, Ding Y, Ge L, Ma J, Sun J. Exploring functional metabolites and proteomics biomarkers in late-preterm and natural-born pigs. *Front Vet Sci*. 2024;11:1340849.
47. Wehrend A, Stratmann N, Failing K, Bostedt H. Influence of partus induction on the pH value in the blood of newborn piglets. *J Vet Med Physiol Pathol Clin Med*. 2005;52(9):472–3.
48. Bostedt H, Walser K. Neugeborenen-und Säuglingskunde der tiere. Stuttgart: In.: Enke; 2008.
49. Chawla D, Agarwal R, Deorari AK, Paul VK. Fluid and electrolyte management in term and preterm neonates. *Indian J Pediatr*. 2008;75:255–9.
50. Hiss-Pesch S, Daniel F, Dunkelberg-Denk S, Mielenz M, Sauerwein H. Transfer of maternal haptoglobin to suckling piglets. *Vet Immunol Immunopathol*. 2011;144(1–2):104–10.
51. Muro BBD, Oliveira ACR, Carnevale RF, Leal DF, Monteiro MS, Poor AP, Pereira FA, de Souza LJ, Ferreira JB, Almond GW. Altrenogest supplementation during early pregnancy improves reproductive outcome in pigs. *Animals*. 2022;12(14):1801.
52. Llamas Moya S, Boyle L, Lynch P, Arkins S. Age-related changes in pro-inflammatory cytokines, acute phase proteins and cortisol concentrations in neonatal piglets. *Neonatology*. 2007;91(1):44–8.
53. Martin M, Tesouro M, González-Ramón N, Piñeiro A, Lamprea F. Major plasma proteins in pig serum during postnatal development. *Reprod Fertility Dev*. 2005;17(4):439–45.
54. Andersen CBF, Stødkilde K, Saederup KL, Kuhlee A, Raunser S, Graversen JH, Moestrup SK. Haptoglobin. *Antioxid Redox Signal*. 2017;26(14):814–31.
55. Levy AP, Asleh R, Blum S, Levy NS, Miller-Lotan R, Kalet-Litman S, Anbinder Y, Lache O, Nakhoul FM, Asaf R. Haptoglobin: basic and clinical aspects. *Antioxid Redox Signal*. 2010;12(2):293–304.
56. Nowland TL, van Wettene WHEJ, Plush KJ. Allowing Sows to Farrow unconfin ed has positive implications for Sow and piglet welfare. *Appl Anim Behav Sci*. 2019;221:104872.
57. Lewin L, Melmed S, Passwell J, Yannai Y, Brish M, Orda S, Boichis H, Bank H. Myoinositol in human neonates: serum concentrations and renal handling. *Pediatr Res*. 1978;12(1):3–6.
58. Dazuk V, Rocha Gebert R, dos Reis JH, Baldissera MD, Paiano D, da Silva AS. Glucose and Urea levels in suckling piglets. *Comp Clin Path*. 2019;28:567–9.
59. James B, Goodband R, Unruh J, Tokach M, Nelssen J, Dritz S. A review of creatine supplementation and its potential to improve pork quality. *J Appl Anim Res*. 2002;21(1):1–16.
60. Mills KM, Shirley LK, Sharp K, Garcia R, Suarez-Trujillo A, Stewart KR. Effects of induction on the farrowing process and piglet blood parameters at the time of farrowing. *Transl Anim Sci*. 2021;5(2):txab032.
61. Tuchscherer M, Puppe B, Tuchscherer A. Untersuchungen zum einfluss der Zitzenposition auf ausgewählte Milchinhaltsstoffe von Primiparen Sauen während der laktation. *Berl Munch Tierarztl Wochenschr*. 2006;119:74–80.
62. Milligan BN, Dewey CE, de Grau AF. Neonatal-piglet weight variation and its relation to pre-weaning mortality and weight gain on commercial farms. *Prev Vet Med*. 2002;56(2):119–27.
63. Oliviero C. Offspring of hyper prolific sows: immunity, birthweight, and heterogeneous litters. *Mol Reprod Dev*. 2023;90(7):580–4.
64. Gradel AKJ, Kildegaard J, Ludvigsen TP, Porsgaard T, Schou-Pedersen AMV, Fels JJ, Lykkesfeldt J, Refsgaard HH. The counterregulatory response to hypoglycaemia in the pig. *Basic Clin Pharmacol Toxicol*. 2020;127(4):278–86.
65. Stange K, Miersch C, Sponder G, Röntgen M. Low birth weight influences the postnatal abundance and characteristics of satellite cell subpopulations in pigs. *Sci Rep*. 2020;10(1):6149.
66. Odle J. New insights into the utilization of medium-chain triglycerides by the neonate: observations from a piglet model. *J Nutr*. 1997;127(6):1061–7.
67. Gondret F, Guével B, Pere M-C, Quesnel H, Billon Y, Com E, Canario L, Louveau I, Liaubet L. Proteomic analysis of adipose tissue during the last weeks of gestation in pure and crossbred large white or Meishan fetuses gestated by sows of either breed. *J Anim Sci Biotechnol*. 2018;9:1–16.
68. Quesnel H, Resmond R, Merlot E, Pèrè M-C, Gondret F, Louveau I. Physiological traits of newborn piglets associated with colostrum intake, neonatal survival and preweaning growth. *Animal*. 2023;17(6):100843.
69. Getty C, Almeida F, Baratta A, Dilger R. Plasma metabolomics indicates metabolic perturbations in low birth weight piglets supplemented with arginine. *J Anim Sci*. 2015;93(12):5754–63.
70. Ekert Kabalin A, Balenović T, Šperanda M, Milinković-Tur S, Štoković I, Menčik S, Maurić M, Pavičić Ž. Serum biochemical parameters in suckling piglets with low and average birth mass. *Vet Arh*. 2017;87(2):171–84.
71. Decaluwé R, Maes D, Wuyts B, Cools A, Piepers S, Janssens G. Piglets' colostrum intake associates with daily weight gain and survival until weaning. *Livest Sci*. 2014;162:185–92.
72. Zaleski H, Hacker R. Comparison of viability scoring and blood gas analysis as measures of piglet viability. *Can J Anim Sci*. 1993;73(3):649–53.
73. Metges CC, Görs S, Lang IS, Hammon HM, Brüssow K-P, Weitzel JM, Nürnberg G, Rehfeldt C, Otten W. Low and high dietary protein: carbohydrate ratios during pregnancy affect maternal-fetal glucose metabolism in pigs. *J Nutr*. 2014;144(2):155–63.

Publisher's note

Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

6 Diskussion

6.1 Diskussion der Ergebnisse

6.1.1 Beeinflussung von Stoffwechsel und Organreife durch das Geburtsgewicht

In der derzeitigen Schweinehaltung werden vorwiegend Rassen mit großen Würfen eingesetzt. Eines der mit der reproduktiven Steigerung in Verbindung stehenden Probleme stellt die Geburt von untergewichtigen Neonaten dar, deren Anteil je Wurf nicht unerheblich ist. In der durchgeführten investigativen Arbeit betrug der Anteil hypotropher Ferkel 25,4 % bei der Deutschen Landrasse und 15,1 % bei dem Deutschen Sattelschwein.

Ein zentraler Punkt der vorgelegten Studien war, eine exakte Unterteilung der Ferkel nach ihrem Geburtsgewicht vorzunehmen, um Zusammenhänge zwischen klassifiziertem Geburtsgewicht und Einflüssen von exogenen und endogenen Faktoren auf deren weitere Entwicklung darstellen zu können. Daher wurden die neugeborenen Ferkel anhand ihres Geburtsgewichtes in drei Geburtsgewichtsklassen – hypotroph, eutroph, hypertroph – unterteilt. Als Grenzen wurden die bestandseigenen Perzentile genutzt. Es zeigte sich allerdings, dass sich die eutrophen und hypertrophen Ferkel metabolisch ähnelten, während sich die hypotrophen davon abgrenzen ließen (Lickfett et al., 2025a). Somit konnte kein Vorteil eines überdurchschnittlich hohen Geburtsgewichts nachgewiesen werden. Es scheinen dagegen bei hypotrophen Ferkeln Kompensationsmechanismen nötig zu sein, um die neonatale Adaptationsperiode zu überleben. Aus diesem Grund wurden für die weiteren statistischen Analysen die eu- und hypertrophen Ferkel als Kontroll-Ferkel zusammengefasst und den hypotrophen Ferkeln gegenübergestellt.

Die Auswirkungen des Geburtsgewichts auf die Ferkel stimmen in beiden Publikationen überein. Bei Ferkeln mit einem geringen Geburtsgewicht liegen Defizite im Energiestoffwechsel vor, weshalb sie für den sogenannten Hypoglykämie-Hypothermie-Komplex prädisponiert sind, was zu einem überproportional häufigen Verenden dieser Tiere führt. Das geht mit Ergebnissen aus vorausgegangenen Untersuchungen einher (Herpin et al., 2002; Baxter et al., 2008; Kammersgaard et al., 2011). Auch konnten in dieser Untersuchung Hinweise darauf gefunden werden, dass die Ferkel mit einem geringen Geburtsgewicht mit einer geringeren Organreife geboren werden. Dabei ist zu beachten, dass in dieser Untersuchung ausschließlich Ferkel betrachtet wurden, die überlebten. Bei Ferkeln, die die neonatale Adaptationsperiode nicht überlebten, sind diese Effekte möglicherweise noch stärker ausgeprägt zu erwarten. Auswirkungen der Rasse auf das Geburtsgewicht sind im Kapitel 6.1.2.1 dargestellt.

Die Saugferkelverluste bis zum 28. Lebenstag beliefen sich in der vorliegenden Untersuchung auf insgesamt 15,7 %. Wie in vorausgegangenen Untersuchungen auch (Baxter et al., 2008;

Devillers et al., 2011; Kilbride et al., 2012; Diehl et al., 2022; Gladbach, 2022) waren die meisten Saugferkelverluste während der früh-postnatalen Adaptationsperiode zu verzeichnen (Abbildung 3). Hypotrophe Ferkel verendeten überproportional häufig (Lickfett et al., 2025b), was ebenfalls mit vorherigen Studien übereinstimmt (Baxter et al., 2008; Devillers et al., 2011; Pedersen et al., 2011; Nuntapaitoon et al., 2018; Huting et al., 2019; Zeng et al., 2019; Blim, 2020; Schild et al., 2020; Schoos et al., 2023; Mbuthia et al., 2025).

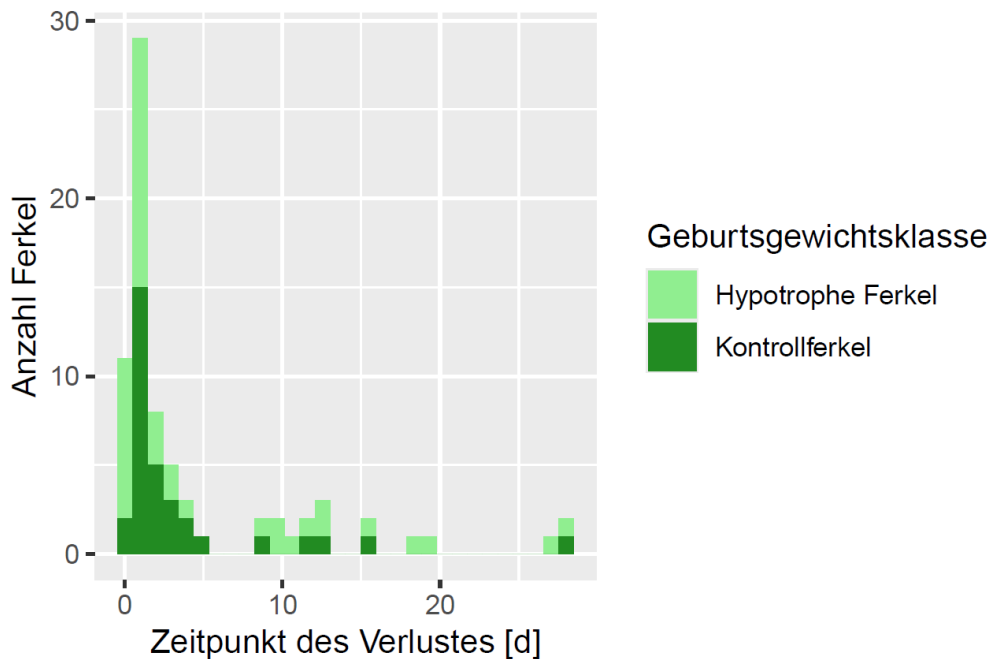


Abbildung 3: Zeitpunkte der Saugferkelverluste während der Säugeperiode, unterteilt in hypotrophe Ferkel (hellgrün) und Kontrollferkel (eutrophe und hypertrophe Ferkel; dunkelgrün) ohne Berücksichtigung von Rasse, Haltungssystem und Geburtsinduktion. Nicht veröffentlicht.

6.1.1.1 Gegenüberstellung von Stoffwechseln von hypotrophen Ferkeln und solchen mit IUGR-Symptomatik

Nachdem in den Publikationen (Lickfett et al., 2025a; Lickfett et al., 2025b) der Vergleich zwischen hypotrophen Ferkeln sowie solchen mit einem höheren Geburtsgewicht durchgeführt wurde, soll im Folgenden der Vergleich mit Angaben zu pathologisch-kleinen Ferkeln aus der Literatur erfolgen.

In der vorliegenden Untersuchung wurden ausschließlich Ferkel mit einem Geburtsgewicht von mehr als 800 g betrachtet, um ein IUGR-Geschehen weitgehend auszuschließen. Diese pathologisch-kleinen Ferkel fallen neben dem meist sehr geringen Geburtsgewicht durch eine veränderte Kopfform auf. Wie die hypotrophen Ferkel, haben IUGR-Ferkel geringere Rektaltemperaturen in den ersten Stunden *post natum* (Amdi et al., 2016; Loyens et al., 2024), allerdings waren die Rektaltemperaturen von IUGR-Ferkeln noch geringer als die von Ferkeln mit einem geringen Geburtsgewicht (Loyens et al., 2024). IUGR-Ferkel benötigten zudem

mehr Zeit bis zur ersten Kolostrumaufnahme, aber die aufgenommene Kolostrummenge unterschied sich nicht von der der leichtgewichtig geborenen Ferkel (Loyens et al., 2024). Auch wenn keine Unterschiede in der Magenentleerungsrate zwischen Ferkeln mit und ohne IUGR-Symptomatik gefunden wurden, waren bei IUGR-Ferkeln 15 und 30 min *post natum* die NEFA- und Albumin-Konzentrationen im Plasma geringer (Amdi et al., 2016). Bei den hypotrophen Ferkeln der eigenen Untersuchung waren diese beiden Metaboliten lediglich numerisch geringer als bei Ferkeln mit höherem Geburtsgewicht im Alter von 0,5-6 h (NEFA: hypotroph: $91,45 \pm 13,17 \mu\text{mol/l}$; Kontrolle: $130,87 \pm 8,96 \mu\text{mol/l}$; $P = 0,763$; Albumin: hypotroph: $0,98 \pm 0,05 \text{ g/dl}$; Kontrolle: $1,19 \pm 0,05 \text{ g/dl}$; $P = 0,429$ (Lickfett et al., 2025a); NEFA: hypotroph: $87,57 \pm 13,20 \mu\text{mol/l}$; Kontrolle: $111,92 \pm 8,91 \mu\text{mol/l}$; $P = 0,869$; Albumin: hypotroph: $1,01 \pm 0,05 \text{ g/dl}$; Kontrolle: $1,07 \pm 0,03 \text{ g/dl}$; $P = 0,495$ (Lickfett et al., 2025b)). Nach Amdi et al. (2013) waren bei IUGR-Ferkeln 24 Stunden *post natum*, wie bei den hypotrophen Ferkeln in der eigenen Untersuchung zu diesem Zeitpunkt auch, geringere Glukose-Konzentrationen (hypotroph: $5,00 \pm 0,34 \text{ mmol/l}$; Kontrolle: $6,33 \pm 0,20 \text{ mmol/l}$; $P = 0,031$ (Lickfett et al., 2025a); hypotroph: $5,36 \pm 0,27 \text{ mmol/l}$; Kontrolle: $6,11 \pm 0,18 \text{ mmol/l}$; $P = 0,009$ (Lickfett et al., 2025b)) und höhere Laktatgehalte (hypotroph: $5,08 \pm 0,32 \text{ mmol/l}$; Kontrolle: $4,82 \pm 0,24 \text{ mmol/l}$; $P = 0,017$ (Lickfett et al., 2025a); hypotroph: $5,14 \pm 0,33 \text{ mmol/l}$; Kontrolle: $5,24 \pm 0,27 \text{ mmol/l}$; $P = 0,027$ (Lickfett et al., 2025b)) festzustellen als bei unauffälligen Ferkeln (Amdi et al., 2013) beziehungsweise Kontrollferkeln (Lickfett et al., 2025a; Lickfett et al., 2025b).

Somit scheinen die Übergänge zwischen physiologisch-kleinen und pathologisch-kleinen Ferkeln fließend zu sein, ebenso wie die klinische Ausprägung der IUGR-Symptomatik. Die vorliegenden Ergebnisse bieten daher insgesamt die Möglichkeit, gezielter den Problemen leichtgewichtig geborener Ferkel nachzugehen.

6.1.1.2 Ansätze zur Verbesserung des Überlebens von hypotrophen Ferkeln

Weil Prävention etwaigen Interventionsmaßnahmen vorzuziehen ist, scheint es sinnvoll, das individuelle Geburtsgewicht durch gezielte züchterische Selektion auf dieses zu erhöhen. Die Möglichkeiten, das Geburtsgewicht durch die Fütterung zu beeinflussen, sind dagegen allgemein eher gering (Langendijk et al., 2023). Rooney et al. (2020) berichteten allerdings, dass bei Fütterung einer energiearmen Diät ab dem 108. Gestationstag die Ferkel vermehrt IUGR-Symptome aufgewiesen haben. Ebenso beschrieben Ji et al. (2017) die Bedeutung einer angepassten Ernährung für die Entwicklung der Feten.

Ferkel mit einem höheren Geburtsgewicht verendeten zum einen weniger häufig als Ferkel mit einem unterdurchschnittlichen Geburtsgewicht (Lickfett et al., 2025b). Das geht mit den Ergebnissen vorheriger Untersuchungen einher (Baxter et al., 2008; Pedersen et al., 2011). Zum anderen waren die Verluste in homogenen Würfen geringer (Charneca et al., 2023). Wenn allerdings leichtgewichtige Ferkel geboren werden, müssen diese gezielt unterstützt

werden. Da in der vorliegenden Untersuchung festgestellt wurde, dass bei leichtgewichtig geborenen Ferkeln ein Energiemangel herrscht, ist insbesondere die Kolostrumversorgung sicherzustellen. Jedes Ferkel sollte mindestens 200 bis 250 g Kolostrum aufnehmen (Quesnel et al., 2012; Theil et al., 2014). Leichtgewichtige Ferkel können auch gezielt mit Glukose als schnell verfügbare Energiequelle unterstützt werden (Engelsmann et al., 2019). Abhängig von der Dosis profitieren IUGR-Ferkel auch von der L-Arginin-Supplementation (Long et al., 2025). Aber auch durch Aufwärmen und Abtrocknen der Ferkel nach der Geburt kann den Ferkeln geholfen werden, Energieverluste zu verringern (Vande Pol et al., 2020a). Nichtsdestotrotz ist zu beachten, dass die leichtgewichtigen Ferkel auch teilweise Defizite in der Organentwicklung zeigten. Daher muss bei allen Maßnahmen drauf geachtet werden, dass die Ferkel mögliche Energieträger auch absorbieren können. Auch scheint die Supplementation von Kohlenhydraten zielführender als von Aminosäuren, um den Metabolismus mit der Stickstoffelimination nicht zusätzlich zu belasten. Weitere Untersuchungen zur Absorptionskapazität der Ferkel scheinen daher auch interessant und können Aussagen treffen, in welchem Umfang parenterale Energiesupplementationen nötig sind. Dafür scheint es auch zweckmäßig, die Bereiche der Geburtsgewichtsgruppen noch kleiner zu gestalten, um eventuell weitere Unterschiede herauszuarbeiten und möglichst gewichtsindividuelle Lösungsansätze entwickeln zu können.

6.1.2 Einfluss der Rasse auf Geburtsgewicht, klinische Parameter und Organreife der Ferkel

6.1.2.1 Rasseabhängigkeit der Wurfgröße und des Geburtsgewichts

Die Wurfgröße bei der autochthonen Rasse Deutsches Sattelschwein ist relativ gering, gemessen an den derzeit in der Schweinezucht üblichen Wurfgrößen. Sie entspricht in etwa der, die auch bei anderen alten Schweinerassen wie dem Schwäbisch Hällischem Schwein (Petig, 2020), Pulawska oder Britischem Sattelschwein (Leenhouwers and Merks, 2013) genannt werden. Aufgrund der Zuchterfolge in der Schweinehaltung im Verlauf der letzten Jahrzehnte konnten die Wurfgrößen bei den modernen Rassen und Kreuzungslinien wesentlich gesteigert werden. Es besteht also eine erhebliche Diskrepanz in der reproduktiven Leistung zwischen alten und neueren Rassen beziehungsweise Linien. Dies ist deswegen kritisch zu sehen, weil durch diese Leistungssteigerungen gewisse ökonomische Vorteile geschaffen wurden, aber sich damit auch verschiedene, nicht zu negierende Nachteile auf maternaler und fetaler Ebene ergeben haben.

Die Wurfgrößen bei den beiden, in dieser Untersuchung einbezogenen Schweinerassen – Deutsches Sattelschwein und Deutsche Landrasse –, beliefen sich für das Deutsche Sattelschwein auf durchschnittlich $12,0 \pm 2,8$ Ferkel mit Variationen von 5 – 16

gesamtgeborenen Ferkeln und für die Deutsche Landrasse auf $17,4 \pm 2,6$ gesamtgeborene Ferkel mit Variationen von 13 – 21 gesamtgeborenen Ferkeln. Für das Deutsche Sattelschwein werden ähnliche Wurfgrößen in anderen Untersuchungen angegeben (Leenhouders and Merks, 2013; König et al., 2021; Gladbach, 2022). Für hochproliferative Schweinelinien werden in der Literatur durchschnittliche Wurfgrößen genannt, die auf ähnlicher Höhe wie die bei der in der eigenen Untersuchung eingesetzten Rasse Deutsche Landrasse liegen (Vernunft et al., 2018; Langendijk and Soede, 2023). Es werden aber auch Schweinekollektive genannt, die noch höhere durchschnittliche Wurfgrößen aufwiesen (Oliviero et al., 2019; Blim, 2020; Lehn et al., 2025).

In den Geburtsgewichtsklassen – hypotroph, eutroph, hypertroph – konnten hingegen keine Unterschiede zwischen den Rassen gefunden werden (Lickfett et al., 2025a). Aus den Ergebnissen von Gladbach (2022) geht hervor, dass in deren Untersuchung 15,5 % der Deutschen Sattelschwein-Ferkel ebenso wie 16,0 % der Ferkel der Deutschen Landrasse ein Geburtsgewicht von <1000 g aufwiesen. Während in der Untersuchung von (Gladbach, 2022) die Gewichtsgrenze bei 1000 g festgelegt wurde, wurde in der eigenen Untersuchung aufgrund der bestandseigenen Perzentile ein maximales Gewicht von 1100 g festgelegt, um die Ferkel als hypotroph zu klassifizieren. In der eigenen Untersuchung wurden 24,7 % der Ferkel der Deutschen Landrasse hypotroph geboren, bei dem Deutschen Sattelschwein lediglich 15,1 % (Tabelle 1). Statistisch konnte allerdings kein Unterschied gesichert werden (Lickfett et al., 2025a). Interessant ist dabei, dass es bei den Deutschen Sattelschweinen Würfe gab ($n = 5$), bei denen kein hypotrophes Ferkel geboren wurde (5 – 12 gesamtgeborene Ferkel). Bei der Deutschen Landrasse konnte nur ein Wurf (13 gesamtgeborene Ferkel) verzeichnet werden, bei dem kein hypotrophes Ferkel geboren wurde. Dies kann zumindest als Hinweis darauf gewertet werden, dass es Sauen zu geben scheint, die über eine ausreichende Uteruslänge und damit -kapazität verfügen, um Würfe hervorzubringen, deren Nachkommen alle ein ausreichendes Geburtsgewicht haben.

Tabelle 1: Anzahl der lebendgeborenen Ferkel unterteilt nach Geburtsgewichtsklassen.

Geburtsgewichtsklasse	Deutsches Sattelschwein	Deutsche Landrasse	Gesamt
<800 g	5	24	29
800 – 1100 g	22	46	68
1101 – 1500 g	66	117	183
>1500 g	86	96	182
Gesamt	179	283	462

Die Zunahme des Anteiles an hypotrophen Ferkeln bei großen Würfen berührt die Fragestellung nach der rassengebundenen und somit genetisch festgelegten Länge der *Cornu*

uteri beim Schwein, welche die Uteruskapazität bilden, im Verhältnis zur Zahl der befruchteten Eizellen bei Sauen unterschiedlicher Proliferativität. Auch wenn das Geburtsgewicht negativ mit der Wurfgröße korreliert (Blim, 2020), scheint es sich bei der fetalen Hypotrophie somit nicht ausschließlich um ein Problem der Wurfleistungssteigerung zu handeln, da es auch bei autochthonen Rassen vorkommt. Bereits Schäfer (1941) beschrieb das Auftreten von Ferkeln mit einem sehr geringen Geburtsgewicht, ebenso wie einen geringen Einfluss der Rasse auf das Geburtsgewicht.

König et al. (2021) zeigten, dass die IUGR-Symptomatik, die besonders häufig hypotrophe Ferkel betrifft, sowohl bei Deutschen Sattelschweinen als auch bei Dänischer Genetik auftritt. Weiterhin stellten König et al. (2021) in ihrer Untersuchung geringere Geburtsgewichte bei Ferkeln von Deutschen Sattelschweinsauen als bei Ferkeln von Sauen dänischer Genetik fest. Dabei waren die Plazenten bei Sattelschwein-Muttersauen aber weniger effizient hinsichtlich der Transformationsleistung als bei Muttersauen mit dänischer Genetik; Vaterrasse war jeweils Pietrain. Die Oberfläche und das Gewicht der Plazenta waren jedoch bei den Sattelschweinen größer, was eine mögliche Erklärung für die höheren Geburtsgewichte sein könnte. Da Silva et al. (2017) hingegen beschrieben bei Landrasse- und Landrasse × Yorkshire-Sauen, dass es bei einer höheren Ovulationsrate zu größeren Schwankungen in der Follikel- bzw. Oozyten-Qualität kam, was sich in unterschiedlicher Qualität und Entwicklung der Embryonen widerspiegelte. Das könnte neben der Plazenta-Problematik eine zusätzliche Erklärung für die Hinweise auf ein höheres Entwicklungsstadium der Sattelschwein-Ferkel sein.

6.1.2.2 Effekte der Rasse auf klinische Parameter

In der vorliegenden Untersuchung konnte kein Unterschied im Vitalitätsscore zwischen Neonaten der Deutschen Landrasse und des Deutschen Sattelschweins, unabhängig vom Geburtsgewicht, festgestellt werden (Deutsche Landrasse: $7,2 \pm 0,2$; Deutsches Sattelschwein: $7,2 \pm 0,2$; $P = 0,305$ (Lickfett et al., 2025a)). Bei dieser Auswertung wurden aber hier nur die Daten von denjenigen Ferkeln genutzt, von denen Zeitreihen über die Säugeperiode hinweg erstellt wurden.

Die höheren Rektaltemperaturen der Sattelschweinferkel am ersten Lebenstag können ein Hinweis auf Unterschiede in der fetalen Entwicklung der Nachkommen beider Rassen sein (Deutsches Sattelschwein: $38,1 \pm 0,1$ °C; Deutsche Landrasse: $37,8 \pm 0,1$ °C; $P = 0,013$ (Lickfett et al., 2025a)). Auch Herpin et al. (2004) beschrieben eine rasseabhängige geringere maximale Wärmeproduktion bei Pietrain × Landrace × Large White- im Vergleich zu Meishan-Ferkeln. Daneben hängt die Rektaltemperatur in der frühen neonatalen Adaptation vom Geburtsgewicht ab (Kammersgaard et al., 2011; Pedersen et al., 2011; Schild et al., 2020). Auch das könnte eine Erklärung der höheren Rektaltemperaturen sein, da bei globaler Betrachtung die absolute Anzahl hypotroph geborener Neonaten in der vorliegenden

Untersuchung bei den Deutschen Sattelschweinen geringer war als bei der Deutschen Landrasse (Tabelle 1), auch wenn sich statistisch kein Unterschied finden ließ (Lickfett et al., 2025a).

6.1.2.3 Bedeutung der Rasse für die Organreife der Ferkel

Hinweise auf eine weiter fortgeschrittene Organreife bei Ferkeln des Deutschen Sattelschweins lassen sich auch im Plasma der Ferkel finden. Bei der Durchführung einer partiellen kleinsten Quadratdiskriminanzanalyse (PLSDA) konnten Unterschiede in den Plasmametaboliten zwischen den beiden Rassen gefunden werden ($P = 0,002$; Abbildung 4A). So wiesen die geringere Ammoniak-Konzentration am ersten Lebenstag und höhere Kreatinin-Konzentrationen im Alter von 0,5-6 h und einem Tag sowie geringere Kreatinin-Konzentrationen am vierten Lebenstag der Sattelschweine auf eine höhere hepatische Aktivität und renale Exkretion hin (Ammoniak, 1 d: Deutsche Landrasse: $186,29 \pm 7,14 \mu\text{g/dl}$; Deutsches Sattelschwein: $128,56 \pm 6,41 \mu\text{g/dl}$; $P = 0,019$; Kreatinin: 0,5-6 h: Deutsche Landrasse: $1,63 \pm 0,08 \text{ mg/dl}$; Deutsches Sattelschwein: $1,87 \pm 0,09 \text{ mg/dl}$; $P = 0,003$; d1: Deutsche Landrasse: $0,92 \pm 0,03 \text{ mg/dl}$; Deutsches Sattelschwein: $0,86 \pm 0,05 \text{ mg/dl}$; $P < 0,001$; 4 d: Deutsche Landrasse: $0,76 \pm 0,03 \text{ mg/dl}$; Deutsches Sattelschwein: $0,66 \pm 0,03 \text{ mg/dl}$; $P < 0,001$ (Lickfett et al., 2025a)). Das könnte mit ein Grund dafür sein, weshalb traditionelle Rassen als robust gelten und häufig in alternativen Haltungssystemen eingesetzt werden (Leenhouders and Merks, 2013).

In der Körperzusammensetzung konnten Kuhn et al. (2001) keine Unterschiede zwischen Ferkeln der Deutschen Landrasse und dem Deutschen Sattelschwein finden. In der eigenen Untersuchung lag der Fokus allerdings auf dem Energiestoffwechsel. Diesbezüglich waren Unterschiede zwischen den beiden Rassen ebenfalls gering. So waren bei den Sattelschweinen geringere Laktat-Konzentrationen an Tag 1 und Tag 4 zu finden (1 d: Deutsche Landrasse: $5,58 \pm 0,30 \text{ mmol/l}$; Deutsches Sattelschwein: $4,21 \pm 0,20 \text{ mmol/l}$; $P = 0,025$; 4 d: Deutsche Landrasse: $6,55 \pm 0,38 \text{ mmol/l}$; Deutsches Sattelschwein: $3,88 \pm 0,23 \text{ mmol/l}$; $P = 0,004$ (Lickfett et al., 2025a)). Dieser Hinweis auf einen anaeroben Stoffwechsel könnte auf eine leicht unterschiedliche Organreife bei den Ferkeln zurückzuführen sein. Durch den Nährstofftransfer über die Plazenta beziehungsweise über das Kolostrum ist hierbei auch ein Einfluss der metabolischen Situation des Muttertieres möglich. Dabei ist zu beachten, dass die Futteraufnahme der Sattelschweinsauen *post partum* in einer vorausgegangenen Untersuchung geringer war als die von Sauen der Deutschen Landrasse (Oster et al., 2025). Somit ist eine Mobilisation endogener Energiereserven bei den Sauen zu erwarten, was sich in höheren NEFA-Konzentrationen bei Deutschen Sattelschweinen im Vergleich zur Deutschen Landrasse widerspiegelt (Oster et al., 2025). Allerdings konnten keine Unterschiede im Lipidgehalt des Plasmas der Ferkel während der neonatalen

Adaptationsperiode gefunden werden. Um weitere Aussagen zur Organreife treffen zu können, sind histologische Untersuchungen nötig. Da in der konventionellen Schweinehaltung vorwiegend Kreuzungstiere zur Mast gehalten werden, scheint es zweckmäßig, auch diese in weitere Untersuchungen im Hinblick auf die Genetik zu integrieren.

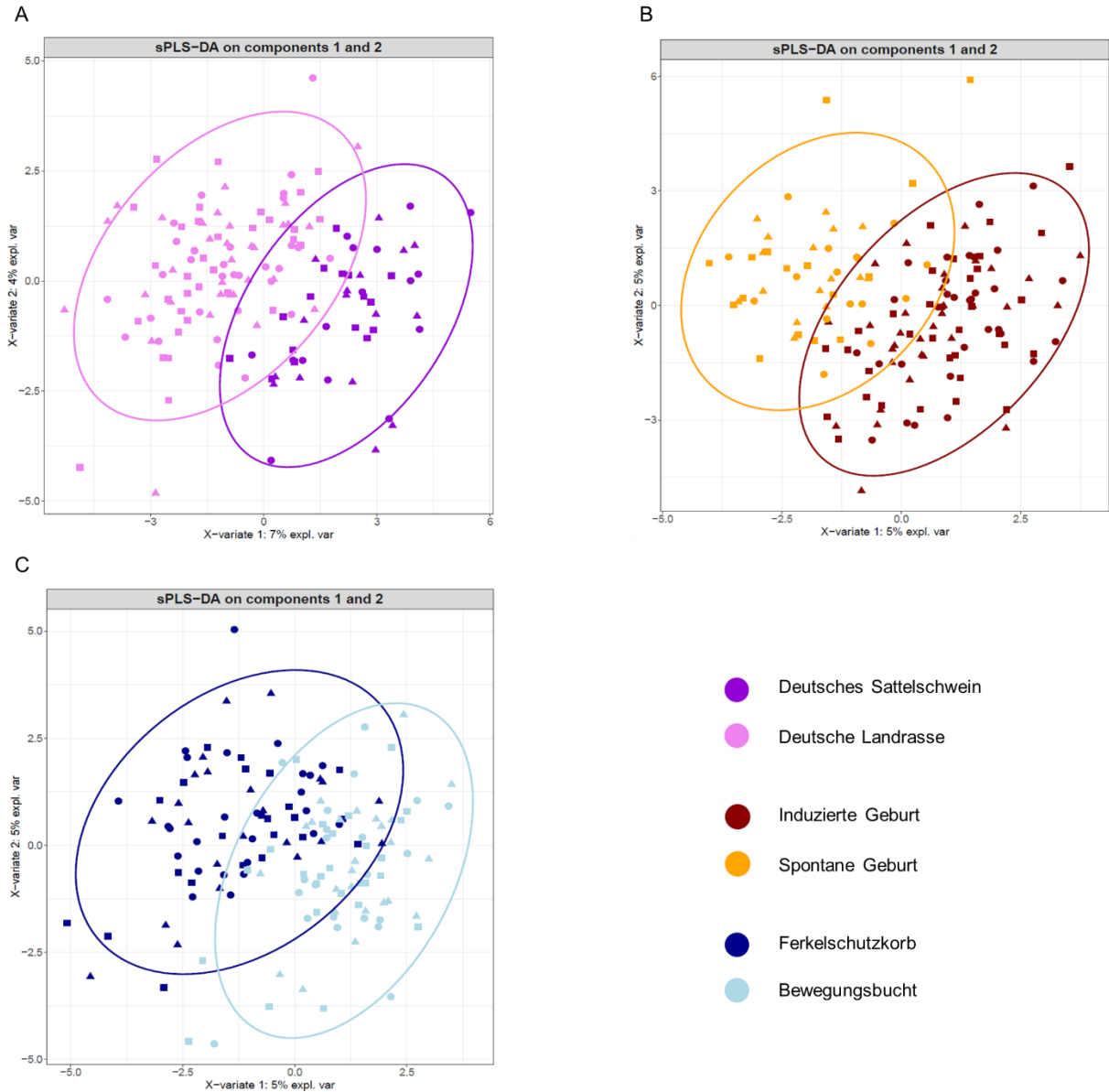


Abbildung 4: Partielle Kleinste-Quadrate-Diskriminanzanalyse in Abhängigkeit von (A) Rasse, (B) Geburtsinduktion und (C) Haltungssystem unter Verwendung der verfügbaren Plasmastoffwechseldaten. Die Analysen wurden in gleicher Weise wie in Lickfett et al. (2025a) durchgeführt und dabei alle metabolischen Daten der Ferkel, von denen Zeitreihen erstellt wurden, verwendet. Die Symbole stellen einzelne Tiere dar, während die Kreise das 95 %-Konfidenzintervall für jede Gruppe angeben. Nicht veröffentlicht.

6.1.3 Auswirkungen des Haltungssystems auf die Saugferkelverluste und den Energiestoffwechsel der Ferkel

6.1.3.1 Zusammenhang zwischen Saugferkelverlusten und Haltungssystem

Bei Betrachtung der produktionstechnischen Merkmale ist festzustellen, dass sich diese nicht wesentlich zwischen den Haltungssystemen unterscheiden haben ($P = 0,487$ (Lickfett et al., 2025a) und $P = 0,600$ (Lickfett et al., 2025b)). Ohne Berücksichtigung von Rasse und Geburtsinduktion wurden in der Bewegungsbucht Saugferkelverluste von 16,9 % verzeichnet, im Kastenstand 14,1 %. So konnten die vielfach berichteten höheren Saugferkelverluste in der Bewegungsbucht (Marchant et al., 2000; Nicolaisen et al., 2019; Dumniem et al., 2023) nicht bestätigt werden. Allerdings wurden, bei ausschließlicher Betrachtung der induzierten Geburten, weniger Ferkel in der Bewegungsbucht abgesetzt als bei Fixierung der Sau im peripartalen Zeitraum im Kastenstand (Kastenstand: Deutsche Landrasse: $13,4 \pm 0,5$; Deutsches Sattelschwein: $9,6 \pm 0,9$; Bewegungsbucht: Deutsche Landrasse: $11,6 \pm 1,1$; Deutsches Sattelschwein: $8,3 \pm 0,8$; $P = 0,020$ (Lickfett et al., 2025a)). Für die schweinehaltenden Betriebe ist die Zahl abgesetzter Ferkel von wirtschaftlicher Bedeutung. Bei ausschließlicher Betrachtung von Tieren der Deutschen Landrasse, die in der Schweinehaltung verbreiteter ist als das Deutsche Sattelschwein, konnte kein Unterschied in der Anzahl abgesetzter Ferkel zwischen den beiden Haltungssystemen gefunden werden ($P = 0,062$).

6.1.3.2 Einfluss des Haltungssystems auf den Metabolismus der Ferkel

Mit Hilfe der PLSDA konnte zunächst generell festgestellt werden, dass das Haltungssystem die Plasma-Parameter der Ferkel beeinflusste ($P = 0,008$; Abbildung 4B). Die Effekte des Haltungssystems in beiden Publikationen sind weitgehend gleich. Es konnte lediglich an Tag 4 ein Effekt des Haltungssystems auf die Chlorid-Konzentration in Lickfett et al. (2025a) gefunden werden, der sich in Lickfett et al. (2025b) nicht finden ließ. Dies kann möglicherweise auch darauf zurückzuführen sein, dass die Ferkel der Deutschen Landrasse aus induzierten Geburten in beiden statistischen Auswertungen berücksichtigt wurden. Insgesamt haben die Ferkel in der Bewegungsbucht einen höheren Energieumsatz. Möglicherweise kann dies als Hinweis auf eine höhere Bewegungsaktivität gewertet werden. Eine denkbare Erklärung wäre, dass Ferkel in Bewegungsbuchten den Muttertieren bei ihren Positionswechseln folgen. Das ist in weiteren Untersuchungen zu überprüfen.

So deuten die geringeren Glukose-Konzentrationen an Tag 1 (Kastenstand: $6,19 \pm 0,26$ mmol/l; Bewegungsbucht: $5,61 \pm 0,26$ mmol/l; $P = 0,018$ (Lickfett et al., 2025a); Kastenstand: $6,21 \pm 0,24$ mmol/l; Bewegungsbucht: $5,53 \pm 0,18$ mmol/l; $P = 0,006$ (Lickfett et al., 2025b)) und Tag 4 (Kastenstand: $6,95 \pm 0,22$ °C; Bewegungsbucht: $6,66 \pm 0,20$ °C; $P = 0,010$ (Lickfett

et al., 2025a); Kastenstand: $7,04 \pm 0,23$ mmol/l; Bewegungsbucht: $6,38 \pm 0,18$ mmol/l; $P = 0,009$ (Lickfett et al., 2025a)) in Kombination mit geringeren Laktatwerten an Tag 1 (Kastenstand: $5,44 \pm 0,33$ mmol/l; Bewegungsbucht: $4,37 \pm 0,17$ mmol/l; $P = 0,017$ (Lickfett et al., 2025a); Kastenstand: $5,68 \pm 0,33$ mmol/l; Bewegungsbucht: $4,76 \pm 0,25$ mmol/l; $P = 0,027$ (Lickfett et al., 2025b)) bei Ferkeln in der Bewegungsbucht auf einen möglicherweise höheren Energieverbrauch hin. Auch die im Plasma gemessenen Kreatinin-Konzentrationen waren während der neonatalen Adaptationsperiode bei Ferkeln in der Bewegungsbucht höher als bei Ferkeln, deren Mutter im Kastenstand fixiert war (0,5-6 h: Kastenstand: $1,70 \pm 0,10$ mg/dl; Bewegungsbucht: $1,80 \pm 0,08$ mg/dl; $P = 0,003$ (Lickfett et al., 2025a); Kastenstand: $1,57 \pm 0,08$ mg/dl; Bewegungsbucht: $1,69 \pm 0,07$ mg/dl; $P = 0,003$ (Lickfett et al., 2025b); 1 d: Kastenstand: $0,83 \pm 0,03$ mg/dl; Bewegungsbucht: $0,95 \pm 0,04$ mg/dl; $P < 0,001$ (Lickfett et al., 2025a); Kastenstand: $0,87 \pm 0,03$ mg/dl; Bewegungsbucht: $1,00 \pm 0,03$ mg/dl; $P < 0,001$ (Lickfett et al., 2025b); 4 d: Kastenstand: $0,70 \pm 0,03$ mg/dl; Bewegungsbucht: $0,71 \pm 0,03$ mg/dl; $P < 0,001$ (Lickfett et al., 2025a); Kastenstand: $0,71 \pm 0,03$ mg/dl; Bewegungsbucht: $0,81 \pm 0,02$ mg/dl; $P < 0,001$ (Lickfett et al., 2025b)). Auch das kann als Hinweis auf eine höhere Bewegungsaktivität gesehen werden.

6.1.3.3 Chancen und Herausforderungen weiterer Haltungssysteme

Da selbst bei den beiden gewählten Haltungssystemen, bei denen der Unterschied in der Bewegungsfreiheit der Sau liegt, sich Hinweise auf Unterschiede im Energiestoffwechsel der Ferkel fanden, wären für nachfolgende Untersuchungen weitere Haltungssysteme interessant. So finden teilweise Gruppenabferkelungen statt oder die Tiere sind in Freilandhaltungen untergebracht. Die Gruppenhaltung ist von Haltungssystemen zu unterscheiden, bei denen sich lediglich die Ferkel zwischen den einzelnen Buchten bewegen können. Auch ist es möglich, dass ein Gruppensäugen erst einige Wochen *post natum* durchgeführt wird und die Sauen bzw. Würfe um die Geburt in einzelnen Buchten aufgestellt sind. Blim (2020) konnte keinen Unterschied im Vitalitätsscore der Ferkel direkt *post natum* zwischen den Neonaten in der Bewegungsbucht oder solchen in Gruppenhaltung finden. Ferkel in diesen beiden Haltungssystemen wiesen aber höhere Vitalitätsscores auf, als die Ferkel, deren Mutter im Kastenstand fixiert war. In Gruppenhaltungen wird das Säugeverhalten unter anderem durch die Gruppenzusammensetzung bestimmt (Weng et al., 2009; Van Nieuwamerongen et al., 2014). Weng et al. (2009) berichtete von einer geringeren Säugefrequenz in Gruppenhaltungen, aber einer längeren Gesamtzeit des Säugens als bei Sauen im Kastenstand. Zudem fand häufig ein synchrones Säugen der Ferkel statt (Maletinská and Špinka, 2001). Es war auch möglich, dass die Ferkel bei anderen Sauen trinken (Maletinská and Špinka, 2001; Van Nieuwamerongen et al., 2014). Das kam vorwiegend bei großen Würfen vor (Maletinská and Špinka, 2001). Dabei ist zu überprüfen, ob dies Auswirkungen auf

den Energiestoffwechsel der Ferkel hat. Es wird teils von geringeren Absetzgewichten (Grimberg-Henrici et al., 2018), teilweise von keinem Unterschied im Absetzgewicht bei Ferkeln in Gruppenhaltung im Vergleich zu konventionellen Haltungssystemen berichtet (Hutten et al., 1997; Hessel et al., 2006). Auch der Zeitpunkt des Beginns des Gruppensäugens wirkte sich nicht auf die Absetzgewichte aus (Thomsson et al., 2016). Vor diesem Hintergrund könnte es interessant sein, ob sich möglicherweise die Kolostrumaufnahme von Ferkeln in Gruppenhaltung von denen in anderen Haltungsformen unterscheidet. Insgesamt etablierte sich nach etwa zehn Tagen eine relativ stabile Zitzenposition der einzelnen Ferkel (Skok and Škorjanc, 2014). Weiter könnte geklärt werden, ob eine generelle Neuverteilung der Ferkel an die Sauen stattfindet oder die Ferkel vorwiegend bei ihrer eigenen Mutter bleiben. Dabei ist auch das Alter, ab dem die Ferkel bei anderen Sauen mittrinken, zu untersuchen. Denn bei individueller Haltung soll ein Wurfausgleich nicht vor 12 h *post natum* erfolgen, damit die Ferkel möglichst das Kolostrum der leiblichen Mutter aufnehmen (Hideshima et al., 2021).

Beim Wurfausgleich zeigte eine Sortierung der Ferkel nach dem Geburtsgewicht die besten Chancen für leichtgewichtiger geborene Ferkel (Hideshima et al., 2021; Vande Pol et al., 2021a). Es besteht aber die Möglichkeit, von den Ergebnissen in der Gruppenhaltung für die Einzelhaltung weiter zu lernen. All das kann sich auf den Stoffwechsel aber auch auf die Ferkelverluste auswirken. Es werden teilweise höhere Saugferkelverluste in Gruppenhaltungen als bei Einzelaufstallung berichtet (Hutten et al., 1997; Thomsson et al., 2016), teilweise war kein Unterschied festzustellen (Wattanakul et al., 1997). Van Nieuwamerongen et al. (2014) kamen zu dem Schluss, dass die Ferkelverluste von der Erfahrung des Personals abhängen. Im Hinblick auf eine Reduktion des Absetzstresses bei Ferkeln aus Gruppenhaltungen denkbar, da die Ferkel bereits mit anderen Würfen bekannt sind und die Gruppen auch nach dem Absetzen bestehen bleiben können. Dies sollte in weiterführenden Untersuchungen überprüft werden. Insgesamt zeigten Ferkel aus Gruppenhaltung eine höhere Wachstumsleistung nach dem Absetzen (Hutten et al., 1997; Kutzer et al., 2009; Van Nieuwamerongen et al., 2014).

In Freilandhaltungen sind die Tiere deutlicheren Temperaturschwankungen ausgesetzt, was Auswirkungen auf den Energiestoffwechsel erwarten lässt. Für das Überleben beschrieben Baxter et al. (2009) in dieser Haltungsform das Geburtsgewicht und die Rektaltemperatur als wichtigste Faktoren. Allerdings war die Zeit bis zur ersten Kolostrumaufnahme unbedeutend für das postnatale Überleben. Johnson et al. (2001) konnte keine Unterschiede in den Ferkelverlusten zwischen Stallhaltung mit Fixierung der Sau im Kastenstand und Gruppenhaltung im Freiland feststellen. Es wurden jedoch saisonale Unterschiede bei den Ferkelverlusten verzeichnet (Rangstrup-Christensen et al., 2018). Da durch den Klimawandel extremere Wetterlagen vermehrt auftreten, müssen sie auch in Überlegungen einbezogen

werden. So beschrieben Chaiyapatmaetee et al. (2025) unter tropischen Bedingungen Verluste von 22,5 % innerhalb der ersten sieben Tage *post natum*. Als Ursache wurden Beeinträchtigungen im Geburtsprozess durch Hitzestress und eine daraus resultierende geringere Ferkelvitalität genannt. Weiterhin muss auch die kalte Jahreszeit mit Temperaturen unterhalb des thermoneutralen Bereiches berücksichtigt werden. Malmkvist et al. (2025) konnten bei beheizten Hütten keinen Effekt auf die Ferkelverluste finden, allerdings wurden die Hütten bei kaltem Wetter verstärkt genutzt. Hinzu kam, dass Ferkel sich in Freilandhaltungen mehr bewegten (Johnson et al., 2001; Nakamura et al., 2011), was mit einem höheren Energieverbrauch einhergeht.

Die Verfügbarkeit verschiedener Nährstoffe, die den Ferkeln zur Verfügung stehen, muss entsprechend berücksichtigt werden. So kamen Prunier et al. (2022) zu dem Schluss, dass es in Freilandhaltung, mit Ausnahme von Böden mit wenig bioverfügbarem Eisen, keine Notwendigkeit besteht, den Ferkeln Eisen zu supplementieren. Das entspricht auch den Ergebnissen von Fjelkner et al. (2024), die allerdings noch einen saisonalen Effekt auf den Hämoglobingehalt bei Ferkeln im Alter von drei Tagen finden konnten. Daher müssen Saison und Klima berücksichtigt werden, ob eine Supplementation von Eisen nötig ist. Das wirft die Fragen auf, ob und in welchem Umfang die Ferkel noch andere Nährstoffe aus ihrer Umgebung aufnehmen können und wie die Auswirkungen der Gesamtsituation auf den Stoffwechsel sind. Auch Untersuchungen des Mikrobioms im Hinblick auf Stall- und Freilandhaltung können möglicherweise helfen, den Gesundheitszustand und die Robustheit der Tiere zu verbessern. In diesem Zusammenhang sind auch Infektionen mit Parasiten zu beachten, die bei ausschließlicher Stallhaltung eine untergeordnete Rolle spielen.

Insgesamt besteht bei den Haltungen in der Gruppe und im Freiland die Möglichkeit, möglichst natürliche Bedingungen nachzuahmen. Betrachtet man Wildschweine, so sondert sich die Bache auch kurz vor dem Frischen von der Rotte ab, um einige Tage nach der Geburt sich mit ihren Frischlingen der Rotte wieder anzuschließen. Im Hinblick auf ein verbessertes Tierwohl sollte dies mitberücksichtigt werden und die Auswirkungen weiterer Haltungsformen auf den Stoffwechsel von Sauen und Ferkeln aber auch auf die endokrine Situation der Tiere sind dahingehend zu untersuchen, um die Haltungsform zu entwickeln, welche den verschiedenen Ansprüchen von Sau und Ferkeln im Zeitraum um die Geburt gerecht werden würde.

6.1.4 Folgen der Geburtsinduktion für die Organreife der Ferkel

Der Zeitpunkt der Geburtseinleitung muss sich an der physiologischen Gestationsdauer orientieren, damit die Ferkel bei der Geburt eine ausreichende Entwicklung haben, um zu überleben (Kirkwood, 2015). In der vorliegenden Untersuchung konnte kein Unterschied in der Gestationslänge zwischen Sauen mit spontanen und induzierten Geburten festgestellt werden

(spontane Geburt: Kastenstand: $115,25 \pm 0,63$ d; Bewegungsbucht: $115,25 \pm 0,75$ d; induzierte Geburt: Kastenstand: $115,00 \pm 0,00$ d; Bewegungsbucht: $115,00 \pm 0,00$ d; $P = 0,528$ (Lickfett et al., 2025b)). Demnach waren keine Unterschiede im Reifezustand der Ferkel zwischen den beiden Gruppen zu erwarten. Auch wenn sich die Vitalitätsscores der Ferkel nicht unterschieden, war die Zeit bis zur ersten Kolostrumaufnahme bei Ferkeln aus spontanen Geburten geringer als bei Ferkeln aus induzierten Geburten (spontane Geburt: Kastenstand: $24,45 \pm 2,65$ min; Bewegungsbucht: $36,05 \pm 3,57$ min; induzierte Geburt: Kastenstand: $39,74 \pm 3,72$ min; Bewegungsbucht: $33,02 \pm 2,95$ min; $P = 0,002$ (Lickfett et al., 2025b)). Vorausgegangene Untersuchungen beschrieben dies als wichtigen Parameter zur Einschätzung der Ferkelvitalität (Casellas et al., 2004; Baxter et al., 2008). Hinzu kommt, dass zwar alle Ferkel direkt nach der Geburt einen Temperatursturz erfahren, allerdings gelang es den Ferkeln aus spontanen Geburten scheinbar besser, ihre Körpertemperatur zu regulieren, was sich in höheren Temperaturen einen Tag *post natum* widerspiegelte (spontane Geburt: $38,3 \pm 0,1$ °C; induzierte Geburt: $37,8 \pm 0,1$ °C; $P = 0,025$ (Lickfett et al., 2025b)). Das geht mit den Ergebnissen von Boonraungrod et al. (2018) einher. Möglicherweise sind damit auch die geringeren Plasmaglukosegehalte am ersten Lebenstag zu erklären (spontane Geburt: $5,84 \pm 0,14$ mmol/l; induzierte Geburt: $5,88 \pm 0,27$ mmol/l; $P = 0,026$; die Statistik beruht auf rangnormaltransformierten Daten (Lickfett et al., 2025b)). Der höhere Energieumsatz während der neonatalen Adaptationsperiode spiegelte sich auch in den geringeren Laktatkonzentrationen Tag 4 (spontane Geburt: $4,52 \pm 0,25$ mmol/l; induzierte Geburt: $6,55 \pm 0,38$ mmol/l; $P = 0,016$ (Lickfett et al., 2025b)) sowie höheren NEFA-Gehalten an Tag 4 (spontane Geburt: $264,54 \pm 16,16$ µmol/l; induzierte Geburt: $223,13 \pm 15,60$ µmol/l; $P = 0,013$ (Lickfett et al., 2025b)) bei spontan geborenen Ferkeln wider. Damit einhergehend wurde auch der Stickstoffstoffwechsel beeinflusst, wenn von den Ferkeln mehr Protein zur Energiegewinnung genutzt wurde (Decaluwé et al., 2014b).

Insgesamt lässt das auf graduelle Unterschiede im Reifezustand der Ferkel schließen. Das konnte mit einer PLSDA bestätigt werden ($P = 0,013$; Abbildung 4C).

Unter Berücksichtigung aller Faktoren könnte somit eine standardmäßige Induktion der Geburten kritisch hinterfragt werden, um den Einsatz entsprechender hormoneller Eingriffe möglichst auf Einzeltiere zu begrenzen. Langfristig ließe sich dadurch eine Selektion auf einen stabilen Geburtsverlauf erreichen.

6.2 Diskussion der Methodik

Die Untersuchung wurde in der Experimentalanlage Schwein des FBN Dummerstorf durchgeführt. Die dort gehaltenen Rassen Deutsche Landrasse und Deutsches Sattelschwein ermöglichten einen direkten Vergleich zweier Schweinerassen unter gleichen Umwelt- und

Ernährungsbedingungen, allerdings in verschiedenen Haltungsformen. Diese drei Kriterien sind als gravierende Vorteile für derartige Untersuchungen, wie die vorgelegte, zu bewerten. So war die Möglichkeit gegeben, in der gleichen Stalleinheit unter den genannten Bedingungen die Sauen im peripartalen Zeitraum sowohl in der Bewegungsbucht zu halten als auch im Kastenstand zu fixieren. Das dortige Management beinhaltete eine standardmäßige Geburtsinduktion am 114. Gestationstag mit PGF_{2α}. Für diese Untersuchung wurde das Protokoll sowohl für die Spontangeburt der Deutschen Landrasse entworfen als auch für die Deutschen Sattelschweine aufgrund der kürzeren Gestationsdauer angepasst. Die Geburtsgewichtsklassen der Ferkel ergaben sich aus den bestandseigenen Perzentilen. Auf Grundlage der Bestandsdaten wurden das 25 %- und 75 %-Perzentil als Grenzen der Geburtsgewichtsklassen festgelegt.

Die Untersuchungseinheit in der vorliegenden Studie war das individuelle Ferkel. Die Anzahl beobachteter Würfe war daher gering, was bei der Interpretation allgemeiner Leistungsmerkmale wie den Saugferkelverlusten zu berücksichtigen war. Jeglicher Umgang mit den Tieren erfolgte ruhig und routiniert, um den Stress und damit mögliche Effekte auf die Ergebnisse so gering wie möglich zu halten.

Während in den ersten Stunden *post natum* von allen lebendgeborenen Ferkeln Daten erhoben und Proben genommen wurden, erfolgte die weitere Probennahme während der Säugeperiode lediglich bei entsprechend ihres Geburtsgewichtes ausgewählten Ferkeln, um die Zahl der weiter belasteten Tiere möglichst gering zu halten.

Die Probenentnahme erfolgte zu zuvor als bedeutsam eingeordneten Zeitpunkten (Diehl et al., 2022). Trotzdem ist die Zahl der Zeitpunkte begrenzt, um die Belastung der Tiere gering zu halten, um die gleichen Tiere ohne Einschränkungen in deren Physiologie mehrfach beproben zu können. Aus diesem Grund war auch das zu entnehmende Blutvolumen begrenzt. Somit konnten lediglich ausgewählte Parameter im Plasma analysiert werden. Auch lassen sich mit den ausgewählten Zeitpunkten nicht alle Dynamiken im Stoffwechsel der Tiere feststellen.

7 Fazit

Um die Saugferkelverluste zu verringern und mehr Tierwohl in der Ferkelerzeugung zu erreichen, sollten Zucht und Management angepasst werden. Dabei könnten die Ergebnisse dieser Untersuchung mit in derartige Überlegungen einbezogen werden. Es konnte nämlich gezeigt werden, dass Hinweise auf Unterschiede in der Organreife der Ferkel der Rassen Deutsche Landrasse und Deutsches Sattelschwein vorliegen. Weitere Rassen könnten daraufhin untersucht werden, wobei solcherart Resultate bei der genetischen Auswahl der Tiere auf den Betrieben genutzt werden könnten. In diesem Kontext wären insbesondere Kreuzungstiere von Interesse, da sie den überwiegenden Teil der Masttiere ausmachen.

Ebenfalls waren bei Ferkeln aus spontanen Geburten Indikatoren für weiter ausgereifte Organe als bei Ferkeln aus induzierten Geburten vorhanden. Geburten sollten somit möglichst nur in Einzelfällen induziert werden. Im Hinblick auf die Geburtsüberwachung erscheint es zweckmäßig, Sauen nach einem unkomplizierten Geburtsgeschehen zu selektieren.

Hinsichtlich des Haltungssystems konnten in dieser Untersuchung Anzeichen für einen etwas höheren Energieverbrauch bei neugeborenen Ferkeln in der Bewegungsbucht gegenüber solchen, deren Mutter im peripartalen Zeitraum im Kastenstand fixiert war, in dieser Untersuchung festgestellt werden. Weitere Haltungssysteme wie Gruppenhaltung und Freilandhaltung wären im Hinblick auf die Auswirkungen auf den Stoffwechsel der Ferkel zu überprüfen, um eine möglichst optimale Haltung für Sau und Ferkel während der Säugeperiode sicherzustellen.

Zudem konnten Indikatoren für Stoffwechseldefizite bei hypotrophen Ferkeln während der neonatalen Adaptationsphase aufgezeigt werden. Die Untersuchung bietet insgesamt eine Grundlage für die Entwicklung gezielter Interventionsmöglichkeiten um hypotroph geborene Ferkel bestmöglich unterstützen zu können. Dessen ungeachtet ist aber die züchterische Bearbeitung des Merkmals Geburtsgewichts notwendig, um Organreife und Vitalität der Neonaten zu erhöhen.

Insgesamt liegen Hinweise vor, dass Stoffwechsel und Organreife der Ferkel von verschiedenen extrinsischen und intrinsischen Faktoren beeinflusst werden. Das muss bei der Optimierung von Haltung und Management berücksichtigt werden und bedarf genauerer und weitergehender Überprüfung.

8 Zusammenfassung

Öffentliche Diskussionen erfordern eine Anpassung von Zucht und Management in der Schweinehaltung, um die nicht unerheblichen Saugferkelverluste zu reduzieren sowie das Tierwohl im peripartalen Zeitraum zu erhöhen. In den ersten Lebenstagen ist die Gesamtsituation für Ferkel als labil zu bezeichnen, besonders für Ferkel mit einem geringeren Geburtsgewicht. Ziel dieser Untersuchung war es daher, die Auswirkungen von Rasse, Haltungssystem, hormoneller Geburtsinduktion und Geburtsgewichtsklasse auf metabolische und endokrinologische Parameter der Ferkel während der Säugeperiode, insbesondere der neonatalen Adaptationsperiode, darzustellen.

Dafür wurden insgesamt 35 Würfe von Tieren der Deutschen Landrasse und des Deutschen Sattelschweins untersucht. Die Geburten fanden sowohl im Kastenstand (1,0 m²) als auch in der Bewegungsbucht (6,5 m²) statt. Die Geburten wurden, entsprechend der mittleren Gestationsdauer, bei Tieren der Deutschen Landrasse (n = 10) an Gestationstag 114 und bei Deutschen Sattelschweinen (n = 17) an Tag 112 mit PGF_{2α} und, bei noch nicht begonnener Geburt, 24 h später mit Carbetocin eingeleitet. Zusätzlich gebaren in beiden Haltungssystemen Tiere der Deutschen Landrasse (n = 8) ohne jegliche hormonellen Interventionen. Die Ferkel dieser sechs Gruppen wurden entsprechend ihres Geburtsgewichts als hypotroph (800 – 1100 g), eutroph (>1100 – 1500 g) und hypertroph (≥1500 g) eingeteilt. Aus jeder der sich so ergebenen 18 Gruppen wurden 8 Ferkel über die Säugeperiode hinweg beprobt. Blutproben wurden von allen lebendgeborenen Ferkeln 0,5-6 h *post natum* genommen, wenn das jeweilige Ferkel mindestens das erste Mal Kolostrum aufgenommen hatte. Nachfolgende Blutproben wurden von 144 vitalen Neonaten verschiedener Geburtsgewichtsklassen nach 24 Stunden (Tag 1), an Tag 4, Tag 20 und einen Tag nach dem Absetzen (ungefähr Tag 29) entnommen, um sogenannte Zeitreihen zu erhalten. Im Plasma wurden die Gehalte von Albumin, Ammoniak, Chlorid, Cortisol, Fructose, Gesamtprotein, Glucose, Haptoglobin, Inositol, Insulin, Kreatinin, Laktat, Natrium, Nicht-veresterten Fettsäuren (NEFA), Triglyceride, Triiodthyronin, Harnstoff und Harnsäure bestimmt.

Zunächst konnte mit Hilfe einer PLSDA gezeigt werden, dass sich die eutrophen und hypertrophen Ferkel metabolisch weitgehend ähnlich verhalten, weshalb sie für die weitere Auswertung zusammengefasst wurden. Hypotrophe Ferkel unterscheiden sich allerdings teilweise metabolisch von ihren schwereren Wurfgeschwistern ($P < 0,05$). Geringere Glukosekonzentrationen im Plasma hypotropher Ferkel als bei Kontroll-Ferkeln induzieren höhere Cortisol-Level an Tag 1 und 4 und damit eine katabole Stoffwechselsituation. Dies kann ein kompensatorischer Mechanismus sein, da hypotrophe Ferkel durch ihr ungünstiges Oberflächen-Volumen-Verhältnis einen relativ höheren Energiebedarf haben und für den Hypoglykämie-Hyperthermie-Komplex prädisponiert sind. Hinzu kommen Hinweise auf einen geringeren Reifegrad dieser Ferkel durch Unterschiede im Stickstoffmetabolismus.

Trotz einer kürzeren Gestationsdauer gibt es Hinweise, dass Ferkel der Rasse Deutsches Sattelschwein mit einer höheren Organreife geboren werden als Ferkel der Deutschen Landrasse. Das spiegelt sich in geringeren Ammoniak-Konzentrationen an Tag 1 und höheren Kreatinin-Konzentrationen an Tag 1 und 4 wider, was auf eine zunächst höhere Leberaktivität und nachfolgend eine höhere renale Ausscheidung schließen lässt. Möglicherweise lag aber auch der Zeitpunkt der Geburtseinleitung bei den Deutschen Sattelschweinen näher am physiologischen Geburtszeitpunkt als bei den Tieren der Deutschen Landrasse.

Welchen Einfluss die Geburtsinduktion auf den Zustand der Neonaten ausübt, wurde ebenfalls überprüft. Auch die Geburtsinduktion scheint sich auf die Organreife und darauffolgend auf den Stoffwechsel auszuwirken. Geringere Glucose- und Laktat-Werte bei höheren NEFA- und Gesamtprotein-Konzentrationen sowie Unterschiede in den Harnstoff-Gehalten deuten auf einen effizienteren Energiestoffwechsel bei Ferkeln aus spontanen Geburten im Vergleich zu denen aus induzierten Geburten hin.

Zusätzlich beeinflusst das Haltungssystem der Sau während der neonatalen Adaptation teilweise den Energiestoffwechsel der Ferkel. So sind die Glucose-Konzentrationen der Ferkel an Tag 1 und 4 sowie Inositol-Konzentrationen im Alter von 0,5-6 h und an Tag 1 in der Bewegungsbucht geringer als bei Ferkeln, deren Mutter im Kastenstand fixiert war. Das lässt Unterschiede in der Aktivität der Ferkel vermuten.

Somit wird die Ferkelvitalität von dem genetischen Hintergrund, der Geburtsinduktion, des Haltungssystems und der Geburtsgewichtsklasse beeinflusst, was sich in Unterschieden in der Organreife und des Energiestoffwechsels widerspiegelt. Das sollte bei Anpassungen des Managements für eine erfolgreiche Ferkelaufzucht Berücksichtigung finden.

9 Conclusion

The public discussions require an adaptation of breeding and management in pig farming in order to reduce pre-weaning mortality and increase animal welfare. Piglets are highly vulnerable during the first few days *post natum*, especially those with a low birth weight. The aim of this study was to investigate the effects of breed, housing system, hormonal parturition induction and birth weight class on metabolic and endocrine parameters of piglets during the suckling period, especially the neonatal adaptation period.

A total of 35 litters of German Landrace and German Saddleback pigs were examined. The farrowings were carried out both in farrowing crates (1.0 m²) and in pens (6.5 m²). According to the mean gestation length, the parturitions were induced with PGF_{2α} on gestation day 114 in German Landrace and on day 112 in German Saddleback and, if parturition had already started, with carbetocin 24 hours later. In addition, German Landrace sows gave birth in both housing systems without any hormonal interventions. The piglets of these six sow groups were classified according to their birth weight as hypotrophic (800 – 1100 g), eutrophic (>1100 – 1500 g) and hypertrophic (≥1500 g). From each of the resulting 18 groups, 8 piglets were sampled during the suckling period. Blood samples were taken from all live-born piglets 0.5-6 h *post natum*, once the respective piglet had suckled for at least one time. Subsequent blood samples were taken at 24 hours (day 1), day 4, day 20 and one day after weaning (approximately day 29) from the selected 144 piglets. The plasma levels of albumin, ammonia, chloride, cortisol, creatinine, fructose, glucose, haptoglobin, inositol, insulin, lactate, non-esterified fatty acids (NEFA), sodium, triglycerides, total protein, triiodothyronine, urea and uric acid were measured.

First of all, a PLSDA showed that the eutrophic and hypertrophic piglets had similar metabolic behaviour, so they were grouped together for subsequent analysis. However, hypotrophic piglets differ partially metabolically from their heavier littermates ($P < 0,05$). Hypotrophic piglets had higher cortisol levels at time 1d and 4d. Lower plasma glucose concentrations in hypotrophic piglets than in control piglets induce higher cortisol levels and thus a catabolic metabolic situation. This might be a compensatory mechanism, as hypotrophic piglets have a relatively higher energy requirement due to their unfavourable surface-to-volume ratio and are predisposed to the hypoglycaemia-hyperthermia complex. There are also indications that these piglets are less mature due to differences in nitrogen metabolism.

Even though the gestation period is shorter, German Saddlebacks seem to be born with a higher organ maturity than German Landrace piglets. The lower ammonia concentrations on day 1 and higher creatinine concentrations on days 1 and 4 indicate a higher initial liver activity and subsequently a higher renal excretion. However, it is also possible that the time of parturition in the Saddlebacks was closer to the physiological parturition time.

Parturition induction also appears to have an effect on organ maturation and subsequently on metabolism. Lower glucose and lactate levels and higher NEFA and total protein concentrations as well as differences in urea levels indicate a more efficient energy metabolism in piglets from spontaneous parturition compared to those from induced parturition.

Furthermore, the housing system of the sow impacts partly the energy metabolism of the piglets during neonatal adaptation. The piglets' plasma glucose concentrations on days 1 and 4 as well as inositol concentrations at the age of 0.5-6 h and on day 1 in the pen are lower than those of piglets with a crated dam. This suggests differences in the physical activity of the piglets.

Consequently, piglet vitality is influenced by genetic background, parturition induction, housing system and birth weight class, which is reflected in differences in organ maturity and energy metabolism. This should be taken into account when making management adaptations for successful piglet rearing.

10 Literaturverzeichnis

- Adi, Y.K., Boonprakob, R., Kirkwood, R.N., Tummaruk, P., 2022. Factors associated with farrowing duration in hyperprolific sows in a free farrowing system under tropical conditions. *Animals*, 12 (21), 2943.
- Adi, Y.K., Boonprakob, R., Kirkwood, R.N., Tummaruk, P., 2024. Factors affecting birth weight and stillbirth in sows housed in a tropical environment. *Reproduction in Domestic Animals*, 59 (1), e14500.
- Almeida, F., Dias, A.A., 2022. Pregnancy in pigs: the journey of an early life. *Domestic Animal Endocrinology*, 78, 106656.
- Amdi, C., Klarlund, M.V., Hales, J., Thymann, T., Hansen, C.F., 2016. Intrauterine growth-restricted piglets have similar gastric emptying rates but lower rectal temperatures and altered blood values when compared with normal-weight piglets at birth. *Journal of Animal Science*, 94 (11), 4583-4590. doi:10.2527/jas.2016-0639.
- Amdi, C., Krogh, U., Flummer, C., Oksbjerg, N., Hansen, C., Theil, P., 2013. Intrauterine growth restricted piglets defined by their head shape ingest insufficient amounts of colostrum. *Journal of Animal Science*, 91 (12), 5605-5613.
- Andersen, I.L., Nævdal, E., Bøe, K.E., 2011. Maternal investment, sibling competition, and offspring survival with increasing litter size and parity in pigs (*Sus scrofa*). *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 65 (6), 1159-1167.
- Andersen, I.L., Vasdal, G., Pedersen, L.J., 2014. Nest building and posture changes and activity budget of gilts housed in pens and crates. *Applied Animal Behaviour Science*, 159, 29-33.
- Ao, Z., Wu, Z., Zhao, H., Wu, Z., Li, Z., 2021. Associations of cord metabolome and biochemical parameters with the neonatal deaths of cloned pigs. *Reproduction in Domestic Animals*, 56 (12), 1519-1528.
- Baxter, E., Jarvis, S., D'eath, R., Ross, D., Robson, S., Farish, M., Nevison, I., Lawrence, A., Edwards, S., 2008. Investigating the behavioural and physiological indicators of neonatal survival in pigs. *Theriogenology*, 69 (6), 773-783.
- Baxter, E.M., Jarvis, S., Sherwood, L., Robson, S.K., Ormandy, E., Farish, M., Smurthwaite, K.M., Roehe, R., Lawrence, A.B., Edwards, S.A., 2009. Indicators of piglet survival in an outdoor farrowing system. *Livestock Science*, 124 (1-3), 266-276.

- Blavi, L., Solà-Oriol, D., Llonch, P., López-Vergé, S., Martín-Orúe, S.M., Pérez, J.F., 2021. Management and feeding strategies in early life to increase piglet performance and welfare around weaning: A review. *Animals*, 11 (2), 302.
- Blim, S., 2020. Über das Geburtsgeschehen bei Schweinen einer hochproliferativen Linie unter verschiedenen Haltungsbedingungen: Quantifizierung der partusrelevanten Belastung anhand klinischer, stoffwechselbezogener und ethologischer Parameter. Universitätsbibliothek Dissertation vet. med. Gießen.
- Blim, S., Lehn, D., Scheu, T., Koch, C., Thaller, G., Bostedt, H., 2022. Evaluation of the electrolyte status in hyperprolific sows on the farrowing process under different housing conditions. *Theriogenology*, 193, 37-46.
- Boonraungrod, N., Sutthiya, N., Kumwan, P., Tossakui, P., Nuntapaitoon, M., Muns, R., Tummaruk, P., 2018. Control of parturition in swine using PGF2 α in combination with carbetocin. *Livestock Science*, 214, 1-8.
- Canario, L., Bidanel, J.-P., Rydhmer, L., 2014. Genetic trends in maternal and neonatal behaviors and their association with perinatal survival in French Large White swine. *Frontiers in Genetics*, 5, 410.
- Canario, L., Billon, Y., Caritez, J.-C., Bidanel, J.P., Laloë, D., 2009. Comparison of sow farrowing characteristics between a Chinese breed and three French breeds. *Livestock Science*, 125 (2-3), 132-140.
- Carney-Hinkle, E., Tran, H., Bundy, J., Moreno, R., Miller, P., Burkey, T., 2013. Effect of dam parity on litter performance, transfer of passive immunity, and progeny microbial ecology. *Journal of Animal Science*, 91 (6), 2885-2893.
- Casellas, J., Rauw, W., Piedrafita, J., Sánchez, A., Arqué, M., Noguera, J., 2004. Viability of Iberian $\times$ Meishan F2 newborn pigs. I. Analysis of physiological and vitality variables. *Journal of Animal Science*, 82 (7), 1919-1924.
- Chaiyapatmaetee, T., Saenghinghoy, N., Charuchinda, P., Wichathippayananon, T., Ruampatana, J., Adi, Y.K., Taechamaeteekul, P., Tummaruk, P., 2025. Intrauterine growth restriction in newborn piglets associated with piglet characteristics, colostrum intake, litter size and parity number in prolific sows. *Theriogenology*, 240, 117416.
- Charneca, R., Freitas, A., Nunes, J., Le Dividich, J., 2023. Effects of the mean weight of uniform litters on sows and offspring performance. *Animals*, 13 (19), 3100.

- Che, L., Yang, Z., Xu, M., Xu, S., Che, L., Lin, Y., Fang, Z., Feng, B., Li, J., Chen, D., 2017. Maternal nutrition modulates fetal development by inducing placental efficiency changes in gilts. *BMC Genomics*, 18, 1-14.
- Da Silva, C.L.A., Broekhuijse, M., Laurensen, B., Mulder, H., Knol, E.F., Kemp, B., Soede, N., 2017. Relationship between ovulation rate and embryonic characteristics in gilts at 35 d of pregnancy. *Journal of Animal Science*, 95 (7), 3160-3172.
- De Vos, M., Huygelen, V., Hesta, M., Willemen, S.A., Fransen, E., Casteleyn, C., Van Cruchten, S., Van Ginneken, C., 2015. Birthweight has no influence on chemical body composition and muscle energy stores in suckling piglets. *Animal Production Science*, 56 (5), 844-849.
- Deblitz, C., Efken, J., 2024. Steckbriefe zur Tierhaltung in Deutschland: Ferkelerzeugung und Schweinemast. In Thünen-Institut für Betriebswirtschaft. Braunschweig.
- Decaluwé, R., Janssens, G., Declerck, I., de Kruif, A., Maes, D., 2012. Induction of parturition in the sow. *Vlaams Diergeneeskundig Tijdschrift*, 81 (3), 158-165.
- Decaluwé, R., Janssens, G., Englebienne, M., Maes, D., 2014a. Effectiveness of different farrowing induction protocols in sows using alphaprostol on day 114 of gestation. *Veterinary Record*, 174 (15), 381-381.
- Decaluwé, R., Maes, D., Wuyts, B., Cools, A., Piepers, S., Janssens, G., 2014b. Piglets' colostrum intake associates with daily weight gain and survival until weaning. *Livestock Science*, 162, 185-192.
- Declerck, I., Dewulf, J., Decaluwé, R., Maes, D., 2016. Effects of energy supplementation to neonatal (very) low birth weight piglets on mortality, weaning weight, daily weight gain and colostrum intake. *Livestock Science*, 183, 48-53.
- Devillers, N., Farmer, C., Le Dividich, J., Prunier, A., 2007. Variability of colostrum yield and colostrum intake in pigs. *Animal*, 1 (7), 1033-1041.
- Devillers, N., Le Dividich, J., Prunier, A., 2011. Influence of colostrum intake on piglet survival and immunity. *Animal*, 5 (10), 1605-1612.
- Diehl, B., Oster, M., Vernunft, A., Wimmers, K., Bostedt, H., 2022. Intrinsic challenges of neonatal adaptation in swine. *Archives Animal Breeding*, 65 (4), 427-438.
- Do, D.N., Strathe, A.B., Jensen, J., Mark, T., Kadarmideen, H.N., 2013. Genetic parameters for different measures of feed efficiency and related traits in boars of three pig breeds. *Journal of Animal Science*, 91 (9), 4069-4079.

Dong, L., Li, H., Wang, S., Wang, T., Yu, L., Wang, H., 2021. Meishan neonatal piglets tend to have higher intestinal barrier function than crossbred neonatal piglets. *Animal*, 15 (1), 100037.

Dotché, I.O., Bankolé, C.B., Dahouda, M., Biobou, R., Bonou, G.A., Antoine-Moussiaux, N., Dehoux, J.-P., Thilmant, P., Mensah, G.A., Koutinhoun, B.G., 2020. Comparison of reproductive performances of local and improved pigs reared in south Benin. *Tropical Animal Health and Production*, 52, 687-698.

Dumniem, N., Boonprakob, R., Parsons, T.D., Tummaruk, P., 2023. Pen versus crate: a comparative study on the effects of different farrowing systems on farrowing performance, colostrum yield and piglet preweaning mortality in sows under tropical conditions. *Animals*, 13 (2), 233.

Dumniem, N., Suwimonteerabutr, J., Tummaruk, P., 2025. Colostrum and milk production in sows housed in free-farrowing versus crated systems under tropical conditions: Associations with sow metabolic state, oxidative stress, and piglet survival. *Theriogenology*, 247, 117572.

Ekert Kabalin, A., Balenović, T., Šperanda, M., Milinković-Tur, S., Štoković, I., Menčik, S., Maurić, M., Pavičić, Ž., 2017. Serum biochemical parameters in suckling piglets with low and average birth mass. *Veterinarski arhiv*, 87 (2), 171-184.

Engelsmann, M.N., Hansen, C.F., Nielsen, M.N., Kristensen, A.R., Amdi, C., 2019. Glucose injections at birth, warmth and placing at a nurse sow improve the growth of IUGR piglets. *Animals*, 9 (8), 519.

Feldpausch, J.A., Jourquin, J., Bergstrom, J.R., Borgen, J.L., Bokenkroger, C.D., Davis, D.L., Gonzalez, J.M., Nelssen, J.L., Puls, C.L., Trout, W.E., 2019. Birth weight threshold for identifying piglets at risk for preweaning mortality. *Translational Animal Science*, 3 (2), 633-640.

Fjelkner, J., Sannö, A., Emanuelson, U., 2024. Iron status in piglets at three days of age and at weaning and possible seasonal effects on the blood haemoglobin levels in a Swedish outdoor pig-producing farm. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 66 (1), 13.

Forner, R., Bombassaro, G., Bellaver, F.V., Maciag, S., Fonseca, F.N., Gava, D., Lopes, L., Marques, M.G., Bastos, A.P., 2021. Distribution difference of colostrum-derived B and T cells subsets in gilts and sows. *PLoS One*, 16 (5), e0249366.

Gladbach, C., 2022. Untersuchungen über den Einfluss der Gen-Umwelt-Interaktion auf klinische, endokrinologische und metabolische Parameter im Verlauf der Geburt bei einer Schweinerobustrasse (Angler Sattelschwein) und einer modernen reproduktiv

leistungsstarken Schweinerasse (Deutsche Landrasse). Dissertation vet. med. Gießen. VVB Laufersweiler Verlag.

Glencorse, D., Plush, K., Hazel, S., D'Souza, D., Hebart, M., 2019. Impact of non-confinement accommodation on farrowing performance: A systematic review and meta-analysis of farrowing crates versus pens. *Animals*, 9 (11), 957.

Gokuldas, P., Tamuli, M., Mohan, N., Barman, K., Sahoo, N., 2015. A comparative analysis of reproductive performance of different pig breeds under intensive management systems in sub-tropical climate. *Indian Journal of Animal Sciences*, 85 (9), 1042-1045.

Goumon, S., Illmann, G., Moustsen, V.A., Baxter, E.M., Edwards, S.A., 2022. Review of temporary crating of farrowing and lactating sows. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 811810.

Grimberg-Henrici, C., Büttner, K., Ladewig, R., Burfeind, O., Krieter, J., 2018. Cortisol levels and health indicators of sows and their piglets living in a group-housing and a single-housing system. *Livestock Science*, 216, 51-60.

Hales, J., Moustsen, V., Nielsen, M., Hansen, C., 2013. Individual physical characteristics of neonatal piglets affect preweaning survival of piglets born in a noncrated system. *Journal of Animal Science*, 91 (10), 4991-5003.

Hales, J., Moustsen, V.A., Nielsen, M.B., Hansen, C.F., 2014. Higher preweaning mortality in free farrowing pens compared with farrowing crates in three commercial pig farms. *Animal*, 8 (1), 113-120.

Hawe, S.J., Scollan, N., Gordon, A., Muns, R., Magowan, E., 2020. Impact of feeding low and average birthweight pigs on a weight basis post-weaning on growth performance and body composition. *Livestock Science*, 241, 104233.

Heidinger, B., Maschat, K., Kuchling, S., Hochfellner, L., Winckler, C., Baumgartner, J., Leeb, C., 2022. Short confinement of sows after farrowing, but not pen type affects live-born piglet mortality. *Animal*, 16 (2), 100446.

Herpin, P., Damon, M., Le Dividich, J., 2002. Development of thermoregulation and neonatal survival in pigs. *Livestock Production Science*, 78 (1), 25-45.

Herpin, P., Vincent, A., Damon, M., 2004. Effect of breed and body weight on thermoregulatory abilities of European (Pietrain×(Landrace× Large White)) and Chinese (Meishan) piglets at birth. *Livestock Production Science*, 88 (1-2), 17-26.

Hessel, E.F., Reiners, K., Van den Weghe, H.F.A., 2006. Socializing piglets before weaning: Effects on behavior of lactating sows, pre-and postweaning behavior, and performance of piglets. *Journal of Animal Science*, 84 (10), 2847-2855.

- Hideshima, C.S., Alberton, G.C., Fernandes, S.R., Donin, D.G., Gonsalves, R.N., Backes, A.P., Mentges, F.D.M., Silva, A.J.d.S., Farias Júnior, A.S.d., 2021. Influence of biological and management factors on piglets in the maternity phase. *Ciência Animal Brasileira*, 22, e-67396.
- Hill, S.V., del Rocio Amezcua, M., Ribeiro, E.S., O'Sullivan, T.L., Friendship, R.M., 2022. Defining the effect of oxytocin use in farrowing sows on stillbirth rate: A systematic review with a meta-analysis. *Animals*, 12 (14), 1795.
- Höbel, C., 2019. Untersuchungen zum Verhalten von Sauen und Ferkeln sowie zu den Produktionsdaten in verschiedenen Abferkelsystemen. Dissertation Universität München.
- Huting, A.M., Sakkas, P., Kyriazakis, I., 2019. Sows in mid parity are best foster mothers for the pre-and post-weaning performance of both light and heavy piglets. *Journal of Animal Science*, 97 (4), 1656-1670.
- Hutten, F., Lundeheim, N., Dalin, A.-M., Einarsson, S., 1997. Pre-and post-weaning piglet performance, sow food intake and change in backfat thickness in a group-housing system for lactating sows. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 38, 119-133.
- Islas-Fabila, P., Mota-Rojas, D., Martínez-Burnes, J., Mora-Medina, P., González-Lozano, M., Roldán-Santiago, P., Greenwell-Beare, V., González-Hernández, M., Vega-Manríquez, X., Orozco-Gregorio, H., 2018. Physiological and metabolic responses in newborn piglets associated with the birth order. *Animal Reproduction Science*, 197, 247-256.
- Jahn, L., Schuepbach-Regula, G., Nathues, H., Grahofer, A., 2022. Effect of 1, 25-Dihydroxyvitamin D3-Glycosides on the Farrowing Process and Piglet Vitality in a Free Farrowing System. *Animals*, 12 (5), 611.
- Jarvis, S., Van der Vegt, B.J., Lawrence, A.B., McLean, K.A., Deans, L.A., Chirnside, J., Calvert, S.K., 2001. The effect of parity and environmental restriction on behavioural and physiological responses of pre-parturient pigs. *Applied Animal Behaviour Science*, 71 (3), 203-216.
- Ji, Y., Wu, Z., Dai, Z., Wang, X., Li, J., Wang, B., Wu, G., 2017. Fetal and neonatal programming of postnatal growth and feed efficiency in swine. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 8, 1-15.
- Jiarpinittun, P., Loyawatananan, S., Sangratkanjanasin, P., Kompong, K., Nuntapaitoon, M., Muns, R., De Rensis, F., Tummaruk, P., 2019. Administration of carbetocin after the first piglet was born reduced farrowing duration but compromised colostrum intake in newborn piglets. *Theriogenology*, 128, 23-30.

- Johnson, A., Morrow-Tesch, J., McGlone, J., 2001. Behavior and performance of lactating sows and piglets reared indoors or outdoors. *Journal of Animal Science*, 79 (10), 2571-2579.
- Kammersgaard, T.S., Pedersen, L.J., Jørgensen, E., 2011. Hypothermia in neonatal piglets: interactions and causes of individual differences. *Journal of Animal Science*, 89 (7), 2073-2085.
- Kapell, D.N., Ashworth, C.J., Knap, P.W., Roehe, R., 2011. Genetic parameters for piglet survival, litter size and birth weight or its variation within litter in sire and dam lines using Bayesian analysis. *Livestock Science*, 135 (2-3), 215-224.
- Kielland, C., Wisløff, H., Valheim, M., Fauske, A., Reksen, O., Framstad, T., 2018. Prewaning mortality in piglets in loose-housed herds: etiology and prevalence. *Animal*, 12 (9), 1950-1957.
- Kilbride, A.L., Mendl, M., Statham, P., Held, S., Harris, M., Cooper, S., Green, L.E., 2012. A cohort study of preweaning piglet mortality and farrowing accommodation on 112 commercial pig farms in England. *Preventive Veterinary Medicine*, 104 (3-4), 281-291.
- King, R., Baxter, E., Matheson, S., Edwards, S., 2019. Consistency is key: interactions of current and previous farrowing system on litter size and piglet mortality. *Animal*, 13 (1), 180-188.
- Kirkden, R., Broom, D., Andersen, I., 2013. Piglet mortality: the impact of induction of farrowing using prostaglandins and oxytocin. *Animal Reproduction Science*, 138 (1-2), 14-24.
- Kirkwood, R.N., 2015. Induction of parturition in sows. *The Thai Journal of Veterinary Medicine*, 45 (4), 487-491.
- Knap, P.W., Knol, E.F., Sørensen, A.C., Huisman, A.E., Van Der Spek, D., Zak, L.J., Granados Chapatte, A., Lewis, C.R., 2023. Genetic and phenotypic time trends of litter size, piglet mortality, and birth weight in pigs. *Frontiers in Animal Science*, 4, 1218175.
- Knecht, D., Środoń, S., Duziński, K., 2015. The impact of season, parity and breed on selected reproductive performance parameters of sows. *Archives Animal Breeding*, 58 (1), 49-56.
- Knox, R.V., 2025. Worldwide perspective for swine production and reproduction for the next 20 years. *Theriogenology*, 234, 24-33.
- König, N.L., Wähner, M., Seeger, J., Sigmarsson, H.L., Kauffold, J., 2021. An investigation into uterine capacity based on litter and placental characteristics in two sow lines with different prolificacy (Danish Landrace x Danish Yorkshire versus German Saddleback). *Reproduction in Domestic Animals*, 56 (1), 34-45.

- Kuhn, G., Falkenberg, H., Langhammer, M., Härtung, M., Wegner, J., Ender, K., 2001. Zur Körperzusammensetzung von neugeborenen Ferkeln der Deutschen Landrasse und des Deutschen Sattelschweines (Kurzmitteilung). *Archives Animal Breeding*, 44 (1), 47-52.
- Kutzer, T., Bünger, B., Kjaer, J.B., Schrader, L., 2009. Effects of early contact between non-littermate piglets and of the complexity of farrowing conditions on social behaviour and weight gain. *Applied Animal Behaviour Science*, 121 (1), 16-24.
- Langendijk, P., Fleuren, M., Page, G., 2023. Targeted nutrition in gestating sows: opportunities to enhance sow performance and piglet vitality. *Animal*, 17, 100756.
- Langendijk, P., Plush, K., 2019. Parturition and its relationship with stillbirths and asphyxiated piglets. *Animals*, 9 (11), 885.
- Langendijk, P., Soede, N., 2023. Physiology and management of the peri-parturient sow in the context of changing production conditions. *Reproduction in Domestic Animals*, 58, 84-92.
- Laothong, K., Kamlangsaeng, S., Laipasu, K., Tirakarn, K., Tummaruk, P., 2024. Colostrum intake and neonatal characteristics in piglets experiencing varying lengths of expulsion phase. *Theriogenology*, 227, 128-137.
- Le Dividich, J., Mormède, P., Catheline, M., Caritez, J., 1991. Body composition and cold resistance of the neonatal pig from European (Large White) and Chinese (Meishan) breeds. *Neonatology*, 59 (5), 268-277.
- Le Dividich, J., Rooke, J., Herpin, P., 2005. Nutritional and immunological importance of colostrum for the new-born pig. *The Journal of Agricultural Science*, 143 (6), 469-485.
- Lee, G., Haley, C., 1995. Comparative farrowing to weaning performance in Meishan and Large White pigs and their crosses. *Animal Science*, 60 (2), 269-280.
- Leenhouwers, J., Merks, J., 2013. Suitability of traditional and conventional pig breeds in organic and low-input production systems in Europe: Survey results and a review of literature. *Animal Genetic Resources/Resources génétiques animales/Recursos genéticos animales*, 53, 169-184.
- Lehn, D., 2020. Untersuchungen zum Ablauf der peripartalen Periode des Schweines in verschiedenen Haltungsbedingungen unter besonderer Berücksichtigung des endokrinen Status und ethologischer Merkmale. Dissertation vet. med. Gießen. VVB Lauferweiler Verlag.
- Lehn, D., Blim, S., Oster, M., Otten, W., Failing, K., Scheu, T., Koch, C., Thaller, G., Teifke, J.P., Bostedt, H., 2025. The parturition-relevant hormone profile in hyper-prolific sows under different housing conditions. *Tierärztliche Praxis Ausgabe G: Großtiere/Nutztiere*, 53 (02), 91-108.

Lickfett, H., Oster, M., Vernunft, A., Reyer, H., Görs, S., Metges, C., Bostedt, H., Wimmers, K., 2025a. Influence of genotype and environment on piglet vitality and metabolic state during the suckling period of divergent birth weight classes. *Animal*, 101460.

Lickfett, H., Oster, M., Vernunft, A., Reyer, H., Muráni, E., Görs, S., Metges, C.C., Bostedt, H., Wimmers, K., 2025b. Impact of parturition induction, farrowing environment and birth weight class on endocrine and metabolic plasma parameters related to piglet vitality. *BMC Veterinary Research*, 21 (1), 406. doi:10.1186/s12917-025-04845-2.

Long, D.W., Long, B.D., Nawaratna, G.I., Wu, G., 2025. Oral administration of L-arginine improves the growth and survival of sow-reared intrauterine growth-restricted piglets. *Animals*, 15 (4), 550.

Loyens, M., Van Bockstal, L., Prims, S., Van Cruchten, S., Van Ginneken, C., 2024. Thriving or striving: Comparing intra-uterine growth restricted, low birth weight and normal birth weight piglets within the first 24 hours. *Animals*, 14 (17), 2508.

Mainau, E., Dalmau, A., Ruiz-de-la-Torre, J., Manteca, X., 2010. A behavioural scale to measure ease of farrowing in sows. *Theriogenology*, 74 (7), 1279-1287.

Maletínská, J., Špinka, M., 2001. Cross-suckling and nursing synchronisation in group housed lactating sows. *Applied Animal Behaviour Science*, 75 (1), 17-32.

Malmkvist, J., Kobek-Kjeldager, C., Pedersen, L.J., 2025. Creep heating in outdoor farrowing huts may increase piglet welfare without impacting survival and growth. *Applied Animal Behaviour Science*, 292, 106794.

Marchant, J., Rudd, A., Mendl, M.T., Broom, D.M., Meredith, M., Corning, S., Simmins, P., 2000. Timing and causes of piglet mortality in alternative and conventional farrowing systems. *Veterinary Record*, 147 (8), 209-214. doi: <https://doi.org/10.1136/vr.147.8.209>.

Mbuthia, J.M., Kasper, C., Zenk, M., Bee, G., Metges, C.C., Daş, G., 2025. Predicting piglet survival until weaning using birth weight and within-litter birth weight variation as easily measured proxy predictors. *Animal*, 19 (4), 101479.

Meyer-Hamme, S., Fritzsche, S., Hartmann, W., 2017. Folgenabschätzung zur Anpassung der Haltung von Sauen im Deckzentrum. *Landtechnik*, 72 (5), 225-246.

Mills, K.M., Shirley, L.K., Sharp, K., Garcia, R., Suarez-Trujillo, A., Stewart, K.R., 2021. Effects of induction on the farrowing process and piglet blood parameters at the time of farrowing. *Translational Animal Science*, 5 (2), txab032.

Monteiro, M.S., Muro, B.B., Poor, A.P., Leal, D.F., Carnevale, R.F., Shiroma, M.P., Almond, G.W., Garbossa, C.A., Moreno, A.M., Viana, C.H., 2022. Effects of farrowing induction with

prostaglandins on farrowing traits and piglet performance: A systematic review and meta-analysis. *Theriogenology*, 180, 1-16.

Morello, G., Marchant-Forde, J., Cronin, G., Morrison, R., Rault, J.-L., 2019. Higher light intensity and mat temperature attract piglets to creep areas in farrowing pens. *Animal*, 13 (8), 1696-1703.

Morgenthum, R., Bolduan, G., 1988. Effect of body weight and nutritional factors on duration of farrowing in sows. *Monatshefte für Veterinärmedizin*, 43, 194-196.

Mota-Rojas, D., Rosales, A., Trujillo, M., Orozco, H., Ramírez, R., Alonso-Spilsbury, M., 2005. The effects of vetrabutin chlorhydrate and oxytocin on stillbirth rate and asphyxia in swine. *Theriogenology*, 64 (9), 1889-1897.

Muns, R., Manteca, X., Gasa, J., 2015. Effect of different management techniques to enhance colostrum intake on piglets' growth and mortality. *Animal Welfare*, 24 (2), 185-192.

Muns, R., Nuntapaitoon, M., Tummaruk, P., 2016. Non-infectious causes of pre-weaning mortality in piglets. *Livestock Science*, 184, 46-57.

Muro, B.B., Carnevale, R.F., Andretta, I., Leal, D.F., Monteiro, M.S., Poor, A.P., Almond, G.W., Garbossa, C.A., 2021. Effects of uterotonics on farrowing traits and piglet vitality: a systematic review and meta-analysis. *Theriogenology*, 161, 151-160.

Nakamura, K., Tanaka, T., Nishida, K., Uetake, K., 2011. Behavioral indexes of piglet welfare: comparison of indoor and outdoor housing systems. *Animal Science Journal*, 82 (1), 161-168.

Nam, N.H., Dao, B.T.A., Sukon, P., 2022. Effects of farrowing induction using cloprostenol on sow farrowing characteristics. *Veterinary World*, 15 (6), 1535.

Nam, N.H., Sukon, P., 2022. Incidence of dystocia at piglet level in cloprostenol-induced farrowings and associated risk factors. *Archives Animal Breeding*, 65 (1), 97-103.

Nguyen, K., Cassar, G., Friendship, R., Dewey, C., Farzan, A., Kirkwood, R., 2011. Stillbirth and preweaning mortality in litters of sows induced to farrow with supervision compared to litters of naturally farrowing sows with minimal supervision. *Journal of Swine Health and Production*, 19 (4), 214-217.

Nguyen, K., Cassar, G., Friendship, R., Dewey, C., Farzan, A., Kirkwood, R., Hodgins, D., 2013. An investigation of the impacts of induced parturition, birth weight, birth order, litter size, and sow parity on piglet serum concentrations of immunoglobulin G. *Journal of Swine Health and Production*, 21 (3), 139-143.

- Nicolaisen, T., Lühken, E., Volkmann, N., Rohn, K., Kemper, N., Fels, M., 2019. The effect of sows' and piglets' behaviour on piglet crushing patterns in two different farrowing pen systems. *Animals*, 9 (8), 538.
- Nielsen, B., Su, G., Lund, M., Madsen, P., 2013. Selection for increased number of piglets at d 5 after farrowing has increased litter size and reduced piglet mortality. *Journal of Animal Science*, 91 (6), 2575-2582.
- Nowak, B., Mucha, A., Moska, M., Kruszyński, W., 2020. Reproduction indicators related to litter size and reproduction cycle length among sows of breeds considered maternal and paternal components kept on medium-size farms. *Animals*, 10 (7), 1164.
- Nowland, T.L., van Wetters, W.H.E.J., Plush, K.J., 2019. Allowing sows to farrow unconfined has positive implications for sow and piglet welfare. *Applied Animal Behaviour Science*, 221, 104872.
- Nuntapaitoon, M., Muns, R., Tummaruk, P., 2018. Newborn traits associated with pre-weaning growth and survival in piglets. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 31 (2), 237.
- Nuntapaitoon, M., Tummaruk, P., 2018. Factors influencing piglet pre-weaning mortality in 47 commercial swine herds in Thailand. *Tropical Animal Health and Production*, 50, 129-135.
- Oliviero, C., Heinonen, M., Valros, A., Hälli, O., Peltoniemi, O., 2008. Effect of the environment on the physiology of the sow during late pregnancy, farrowing and early lactation. *Animal Reproduction Science*, 105 (3-4), 365-377.
- Oliviero, C., Heinonen, M., Valros, A., Peltoniemi, O., 2010. Environmental and sow-related factors affecting the duration of farrowing. *Animal Reproduction Science*, 119 (1-2), 85-91.
- Oliviero, C., Junnikkala, S., Peltoniemi, O., 2019. The challenge of large litters on the immune system of the sow and the piglets. *Reproduction in Domestic Animals*, 54, 12-21.
- Olson, G.L., Robine, L., Rosengren, L.B., Baker, C.D., Duggan, M., Chirino, M., Weber, L.P., Harding, J.C., 2009. Parturition induction two days prior to term decreases birth weight and lactational growth, but not piglet maturity, health or post-weaning growth. *Canadian Journal of Animal Science*, 89 (2), 219-228.
- Oster, M., Gladbach, C., Vernunft, A., Reyer, H., Otten, W., Metges, C., Muráni, E., Ponsuksili, S., Frölich, K., Wimmers, K., 2025. Influence of genotype-environment interaction on stress parameters during spontaneous farrowing in modern and traditional pig breeds housed in crates and pens. *Theriogenology*, 117394.

- Panzardi, A., Bernardi, M., Mellagi, A., Bierhals, T., Bortolozzo, F., Wentz, I., 2013. Newborn piglet traits associated with survival and growth performance until weaning. *Preventive Veterinary Medicine*, 110 (2), 206-213.
- Pedersen, L., Berg, P., Jørgensen, G., Andersen, I., 2011. Neonatal piglet traits of importance for survival in crates and indoor pens. *Journal of Animal Science*, 89 (4), 1207-1218.
- Pedersen, L.J., 2018. Overview of commercial pig production systems and their main welfare challenges. In *Advances in pig welfare*, Woodhead Publishing, p. 3-25.
- Petig, M., 2020. Wachstum, Schlachtkörper-und Fleischqualität der bedrohten Schweinerasse Schwäbisch-Hällisches Schwein unter besonderer Berücksichtigung von Haltungs-, Fütterungs-, und Kombinationskreuzungsvarianten.
- Plush, K., Weaver, A., Staveley, L., van Wettere, W., 2018. Maternal magnesium sulfate supplementation in a pre-farrow diet improves factors important for piglet viability. *Animals*, 8 (10), 185.
- Prunier, A., Leblanc-Maridor, M., Pauwels, M., Jaillardon, L., Belloc, C., Merlot, E., 2022. Evaluation of the potential benefits of iron supplementation in organic pig farming. *Open Research Europe*, 2, 11.
- Quesnel, H., Brossard, L., Valancogne, A., Quiniou, N., 2008. Influence of some sow characteristics on within-litter variation of piglet birth weight. *Animal*, 2 (12), 1842-1849.
- Quesnel, H., Farmer, C., Devillers, N., 2012. Colostrum intake: Influence on piglet performance and factors of variation. *Livestock Science*, 146 (2-3), 105-114.
- Rangstrup-Christensen, L., Schild, S.-L.A., Pedersen, L.J., Sørensen, J.T., 2018. Causes of preweaning mortality in organic outdoor sow herds. *Research in Veterinary Science*, 118, 171-180.
- Reiner, G., Hertrampf, B., Richard, H., 2009. Postpartales Dysgalaktiesyndrom der Sau—eine Übersicht mit besonderer Berücksichtigung der Pathogenese. *Tierärztliche Praxis Ausgabe G: Großtiere/Nutztiere*, 37 (05), 305-318.
- Rooney, H.B., O'driscoll, K., O'doherty, J.V., Lawlor, P.G., 2020. Effect of increasing dietary energy density during late gestation and lactation on sow performance, piglet vitality, and lifetime growth of offspring. *Journal of Animal Science*, 98 (1), skz379.
- Rootwelt, V., Reksen, O., Farstad, W., Framstad, T., 2013. Postpartum deaths: piglet, placental, and umbilical characteristics. *Journal of Animal Science*, 91 (6), 2647-2656.

Rutherford, K., Baxter, E., D'eath, R., Turner, S., Arnott, G., Roehe, R., Ask, B., Sandøe, P., Moustsen, V., Thorup, F., 2013. The welfare implications of large litter size in the domestic pig I: biological factors. *Animal Welfare*, 22 (2), 199-218.

Sánchez-Salcedo, J.A., Yáñez-Pizaña, A., 2024. Effects of free farrowing system on the productive performance and welfare of sows and piglets. *Journal of Applied Animal Welfare Science*, 27 (1), 1-11.

Schäfer, H., 1941. Die physiologischen Verhältnisse beim Gebärrakt des Schweines und ihre Beziehungen zu einigen Leistungsäußerungen. *Zeitschrift für Tierzüchtung und Züchtungsbiologie*, 48 (3), 207-254.

Schild, S.-L.A., Foldager, L., Rangstrup-Christensen, L., Pedersen, L.J., 2020. Characteristics of piglets born by two highly prolific sow hybrids. *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 355.

Schodl, K., Revermann, R., Winckler, C., Fuerst-Waltl, B., Leeb, C., Willam, A., Knapp, P., Pfeiffer, C., 2019. Assessment of piglet vitality by farmers-validation of a scoring scheme and estimation of associated genetic parameters. *Animals*, 9 (6), 317.

Schoos, A., Muro, B.B.D., Carnevale, R.F., Chantziaras, I., Biebaut, E., Janssens, G.P.J., Maes, D., 2023. Relationship between piglets' survivability and farrowing kinetics in hyper-prolific sows. *Porcine Health Management*, 9 (1), 37.

Skok, J., Škorjanc, D., 2014. Group suckling cohesion as a prelude to the formation of teat order in piglets. *Applied Animal Behaviour Science*, 154, 15-21.

Souphannavong, C., Sringarm, K., 2016. Influence of pig breeds on growth performance and immunity during pre-weaning period. *International Journal of Environmental and Rural Development*, 7 (1), 22-28.

Stange, K., Miersch, C., Sponder, G., Röntgen, M., 2020. Low birth weight influences the postnatal abundance and characteristics of satellite cell subpopulations in pigs. *Scientific Reports*, 10 (1), 6149.

Taechamaeteekul, P., Dumniem, N., Sang-Gassanee, K., Tummaruk, P., 2022. Control of parturition in hyperprolific sows by using altrenogest and double administrations of PGF2 α . *Theriogenology*, 181, 24-33.

Theil, P., Cordero, G., Henckel, P., Puggaard, L., Oksbjerg, N., Sørensen, M., 2011. Effects of gestation and transition diets, piglet birth weight, and fasting time on depletion of glycogen pools in liver and 3 muscles of newborn piglets. *Journal of Animal Science*, 89 (6), 1805-1816.

- Theil, P.K., Lauridsen, C., Quesnel, H., 2014. Neonatal piglet survival: impact of sow nutrition around parturition on fetal glycogen deposition and production and composition of colostrum and transient milk. *Animal*, 8 (7), 1021-1030.
- Thomsson, O., Sjunnesson, Y., Magnusson, U., Eliasson-Selling, L., Wallenbeck, A., Bergqvist, A.-S., 2016. Consequences for piglet performance of group housing lactating sows at one, two, or three weeks post-farrowing. *PLoS One*, 11 (6), e0156581.
- Threadgold, T., Greenwood, E.C., Van Wettere, W., 2021. Identifying suitable supplements to improve piglet survival during farrowing and lactation. *Animals*, 11 (10), 2912.
- Tospitakkul, P., Kraomkaew, K., Thammasin, K., Uttarak, P., Nuntapaitoon, M., De Rensis, F., Tummaruk, P., 2019. Induction of parturition by double administration of prostaglandin F2 α in sows reduces the variation of gestation length without affecting the colostrum yield and piglet performance. *Journal of Veterinary Medical Science*, 81 (9), 1334-1340.
- Tucker, B.S., Craig, J.R., Morrison, R.S., Smits, R.J., Kirkwood, R.N., 2021. Piglet viability: A review of identification and pre-weaning management strategies. *Animals*, 11 (10), 2902.
- Uddin, M.K., Hasan, S., Peltoniemi, O., Oliviero, C., 2022. The effect of piglet vitality, birth order, and blood lactate on the piglet growth performances and preweaning survival. *Porcine Health Management*, 8 (1), 52.
- Vallet, J.L., Miles, J.R., 2017. The effect of farrowing induction on colostrum and piglet serum immunocrits is dependent on parity. *Journal of Animal Science*, 95 (2), 688-696.
- Van Dijk, A., Van Rens, B., Van der Lende, T., Taverne, M., 2005. Factors affecting duration of the expulsive stage of parturition and piglet birth intervals in sows with uncomplicated, spontaneous farrowings. *Theriogenology*, 64 (7), 1573-1590.
- Van Nieuwamerongen, S., Bolhuis, J., Van Der Peet-Schwering, C., Soede, N., 2014. A review of sow and piglet behaviour and performance in group housing systems for lactating sows. *Animal*, 8 (3), 448-460.
- Van Rens, B., De Koning, G., Bergsma, R., Van Der Lende, T., 2005. Preweaning piglet mortality in relation to placental efficiency. *Journal of Animal Science*, 83 (1), 144-151.
- Vande Pol, K.D., Bautista, R.O., Harper, H., Shull, C.M., Brown, C.B., Ellis, M., 2021a. Effect of rearing cross-fostered piglets in litters of either uniform or mixed birth weights on preweaning growth and mortality. *Translational Animal Science*, 5 (1), txab030.
- Vande Pol, K.D., Tolosa, A.F., Shull, C.M., Brown, C.B., Alencar, S.A., Ellis, M., 2020a. Effect of drying and/or warming piglets at birth on rectal temperature over the first 24 h after birth. *Translational Animal Science*, 4 (4), txaa184.

- Vande Pol, K.D., Tolosa, A.F., Shull, C.M., Brown, C.B., Alencar, S.A., Ellis, M., 2020b. Effect of method of drying piglets at birth on rectal temperature over the first 24 h after birth. *Translational Animal Science*, 4 (4), txaa183.
- Vande Pol, K.D., Tolosa, A.F., Shull, C.M., Brown, C.B., Alencar, S.A., Ellis, M., 2021b. Effect of drying and warming piglets at birth on preweaning mortality. *Translational Animal Science*, 5 (1), txab016.
- Vanden Hole, C., Ayuso, M., Aerts, P., Prims, S., Van Cruchten, S., Van Ginneken, C., 2019. Glucose and glycogen levels in piglets that differ in birth weight and vitality. *Heliyon*, 5 (9), e02510.
- Vanden Hole, C., Cleuren, S., Van Ginneken, C., Prims, S., Ayuso, M., Van Cruchten, S., Aerts, P., 2018. How does intrauterine crowding affect locomotor performance in newborn pigs? A study of force generating capacity and muscle composition of the hind limb. *PLoS One*, 13 (12), e0209233.
- Vasdal, G., Østensen, I., Melišová, M., Bozděchová, B., Illmann, G., Andersen, I.L., 2011. Management routines at the time of farrowing—effects on teat success and postnatal piglet mortality from loose housed sows. *Livestock Science*, 136 (2-3), 225-231.
- Vázquez-Gómez, M., García-Contreras, C., Torres-Rovira, L., Astiz, S., Óvilo, C., González-Bulnes, A., Isabel, B., 2018. Maternal undernutrition and offspring sex determine birth-weight, postnatal development and meat characteristics in traditional swine breeds. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 9, 1-15.
- Vernunft, A., Maass, M., Brüssow, K.-P., 2018. Placental characteristics of german landrace sows and their relationships to different fertility parameters. *Czech Journal of Animal Science*, 63 (9), 339-346.
- Walls, A., Hatze, B., Lomax, S., Bathgate, R., 2022. Defining “normal” in pig parturition. *Animals*, 12 (20), 2754.
- Walser, K., Bostedt, H., 2008. Neugeborenen-und Säuglingskunde der Tiere. In Enke Verlag, Stuttgart.
- Ward, S.A., Kirkwood, R., Plush, K., 2019. Effects of oxytocin and carbetocin on farrowing performance. *Animal Reproduction Science*, 205, 88-93.
- Ward, S.A., Kirkwood, R.N., Plush, K.J., 2020. Are larger litters a concern for piglet survival or an effectively manageable trait? *Animals*, 10 (2), 309.

- Wattanakul, W., Sinclair, A., Stewart, A., Edwards, S., English, P., 1997. Performance and behaviour of lactating sows and piglets in crate and multisuckling systems: a study involving European White and Manor Meishan genotypes. *Animal Science*, 64 (2), 339-349.
- Wehrend, A., Stratmann, N., Failing, K., Bostedt, H., 2005. Influence of partus induction on the pH value in the blood of newborn piglets. *Journal of Veterinary Medicine Series A*, 52 (9), 472-473.
- Weng, R., Edwards, S., Hsia, L., 2009. Effect of individual, group or ESF housing in pregnancy and individual or group housing in lactation on sow behavior. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 22 (11), 1574-1580.
- Weström, B., Arévalo Sureda, E., Pierzynowska, K., Pierzynowski, S.G., Pérez-Cano, F.-J., 2020. The immature gut barrier and its importance in establishing immunity in newborn mammals. *Frontiers in Immunology*, 11, 1153.
- Wiechers, D.-H., Herbrandt, S., Kemper, N., Fels, M., 2022. Does nursing behaviour of sows in loose-housing pens differ from that of sows in farrowing pens with crates? *Animals*, 12 (2), 137.
- Zaleski, H., Hacker, R., 1993. Comparison of viability scoring and blood gas analysis as measures of piglet viability. *Canadian Journal of Animal Science*, 73 (3), 649-653.
- Zaremba, W., Udluft, T., Failing, K., Bostedt, H., 2019. Analysis of the course of birth and the early postpartal period in pigs after hormonal partus induction with special consideration of complication rate. *Animal and Veterinary Sciences*, 7, 29-39.
- Zeng, Z.K., Urriola, P.E., Dunkelberger, J.R., Eggert, J.M., Vogelzang, R., Shurson, G.C., Johnston, L.J., 2019. Implications of early-life indicators for survival rate, subsequent growth performance, and carcass characteristics of commercial pigs¹. *Journal of Animal Science*, 97 (8), 3313-3325.
- Zhang, X., Li, C., Hao, Y., Gu, X., 2020. Effects of different farrowing environments on the behavior of sows and piglets. *Animals*, 10 (2), 320.
- Ziecik, A.J., Przygodzka, E., Jalali, B.M., Kaczmarek, M.M., 2018. Regulation of the porcine corpus luteum during pregnancy. *Reproduction*, 156 (3), R57-R67.

Danksagung

Hiermit möchte ich allen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank geht an Herrn Prof. em. Dr. med. vet. Dr. h.c. mult. Hartwig Bostedt und Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Klaus Wimmers für die Möglichkeit der Promotion und die wissenschaftliche Betreuung. Beiden danke ich für das interessante Thema.

Herrn Dr. troph. Michael Oster möchte ich für die umfassende Betreuung und Hilfe bei allen, im Zuge der Promotion, aufgetretenen Fragen und Problemen meinen Dank aussprechen.

Ebenso bin ich Herrn PD Dr. med. vet. habil. Andreas Vernunft und Herrn Dr. rer. nat. Henry Reyer für die Unterstützung während der Promotion dankbar.

Bei allen bisher genannten Personen möchte ich mich für die Möglichkeit, ein breites Spektrum an Methoden und Wissen erlernt zu haben und anwenden zu dürfen, bedanken und hoffe auf weitere gute Zusammenarbeit.

Diese kostenintensive Untersuchung wäre ohne die finanzielle Unterstützung der Tönnies-Forschung gGmbH nicht möglich gewesen. Vielen Dank dafür.

Für die tatkräftige Unterstützung bei der Probennahme im Stall möchte ich mich bei Tina Maercker und Sonja Uplegger sowie Marianne Zenk und dem gesamten Team der Experimentalanlage Schwein bedanken.

Bei Angela Garve und Gina Fiedler bedanke ich mich für das Einarbeiten im Labor sowie für die dort herrschende angenehme Atmosphäre.

Ein ganz großer Dank geht an meine Familie und Freunde für die Unterstützung während der Promotion.

Allen Kollegen am FBN Dummerstorf, die mich während meiner Promotion begleitet haben, sei für die Zusammenarbeit und das freundliche Arbeitsklima ein Dank ausgesprochen.

Selbstständigkeitserklärung

"Ich erkläre: Ich habe die vorgelegte Dissertation selbständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der "Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis" niedergelegt sind, eingehalten."

Heinke Margarit Elke Lickfett

Anhang

Teile aus dieser Arbeit wurden öffentlich vorgestellt:

- Tag des Doktoranden am FBN Dummerstorf, 18.08.2022:
“The impact of genotype-environment interaction on endocrine and metabolic parameters of piglet vitality”, Heinke Lickfett, Michael Oster, Andreas Vernunft, Hartwig Bostedt, Klaus Wimmers
- DGfZ-Jahrestagung in Kiel, 21./22.09.2022:
„Der Einfluss von Genotyp-Umwelt-Interaktionen auf metabolische Parameter bei porcinen Neonaten“, Heinke Lickfett, Michael Oster, Andreas Vernunft, Hartwig Bostedt, Klaus Wimmers
- Pig Research Summit – THINK Piglet Health & Nutrition 2023 in Kopenhagen, 21./22.09.2023:
„First results of the impact of the environment on metabolic parameters of piglet vitality“, Heinke Lickfett, Michael Oster, Andreas Vernunft, Hartwig Bostedt, Klaus Wimmers
- 57. Jahrestagung Physiologie und Pathologie der Fortpflanzung, gleichzeitig 49. Vet.-Hum.med. Gemeinschaftstagung 2024 in Berlin, 28.02.-01.03.2024:
“Impact of the environment on metabolic parameters of piglet vitality”, Heinke Lickfett, Michael Oster, Andreas Vernunft, Hartwig Bostedt, Klaus Wimmers
- DGfZ-Jahrestagung in Göttingen, 18./19.09.2024:
„Beeinflussen Rasse und Haltung den Stoffwechsel von Ferkeln mit unterschiedlichem Geburtsgewicht?“, Heinke Lickfett, Michael Oster, Andreas Vernunft, Henry Reyer, Solvig Görs, Cornelia C. Metges, Hartwig Bostedt, Klaus Wimmers
- Tag der Promovierenden am FBN Dummerstorf, 08.11.2024:
“Have breed and housing system an impact on the metabolism of piglets of divergent birthweight classes?“, Heinke Lickfett, Michael Oster, Andreas Vernunft, Henry Reyer, Solvig Görs, Cornelia C. Metges, Hartwig Bostedt, Klaus Wimmers
- 8th EAAP Inter-national Symposium on Energy and Protein Metabolism and Nutrition, 15-18.09.2025:
“Influence of genotype and parturition management on metabolic profiles in piglets differing in birth weight”, Heinke Lickfett, Michael Oster, Andreas Vernunft, Henry Reyer, Solvig Görs, Cornelia C. Metges, Hartwig Bostedt, Klaus Wimmers

Die Finanzielle Förderung des Projektes erfolgte durch die Tönnies-Forschung gGmbH.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Herausforderungen in der früh-postnatalen Adaptationsperiode in Anlehnung an den Übersichtsartikel von Diehl et al. (2022).

Abbildung 2: Intrinsische und extrinsische Einflussfaktoren auf die früh-postnatale Vitalität und die Bedeutung für das individuelle Ferkel.

Abbildung 3: Zeitpunkte der Saugferkelverluste während der Säugeperiode unterteilt in hypotrophe Ferkel (hellgrün) und Kontrollferkel (dunkelgrün) ohne Berücksichtigung von Rasse, Haltungssystem und Geburtsinduktion.

Abbildung 4: Partielle Kleinste-Quadrate-Diskriminanzanalyse in Abhängigkeit von (A) Rasse, (B) Geburtsinduktion und (C) Haltungssystem unter Verwendung der verfügbaren Plasmastoffwechseldaten. Die Analysen wurden in gleicher Weise wie in Lickfett et al. (2025a) durchgeführt und dabei alle metabolischen Daten der Ferkel, von denen Zeitreihen erstellt wurden, verwendet. Die Symbole stellen einzelne Tiere dar, während die Kreise das 95 %-Konfidenzintervall für jede Gruppe angeben. Nicht veröffentlicht.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anzahl der lebendgeborenen Ferkel unterteilt nach Geburtsgewichtsklassen.