

Analyse von Bewegungen bei Rindern nach
Bolzenschussbetäubung in Zusammenhang mit
Betäubungseffektivität -
Evaluierung potenzieller Einflussfaktoren und
gerätespezifischer Schlüsselparameter der
Bolzenschussbetäubung

von Anika Lücking

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde
der Tierärztlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität
München

Analyse von Bewegungen bei Rindern nach
Bolzenschussbetäubung in Zusammenhang mit
Betäubungseffektivität -
Evaluierung potenzieller Einflussfaktoren und
gerätespezifischer Schlüsselparameter der
Bolzenschussbetäubung

von Anika Lücking

aus Bröthen

München 2025

Aus dem Veterinärwissenschaftlichen Department der Tierärztlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Lehrstuhl für Tierschutz, Verhaltenskunde, Tierhygiene und Tierhaltung

Arbeit angefertigt unter der Leitung von:

Univ.-Prof. Dr. Dr. Michael Erhard

Angefertigt an der Universität Rostock

Mentorin: Univ.-Prof. Dr. Helen Louton

**Gedruckt mit Genehmigung der Tierärztlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München**

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Reinhard K. Straubinger, Ph.D.

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. Michael H. Erhard

Korreferent: Univ.-Prof. Dr. Kaspar Matiasek

Tag der Promotion: 08. Februar 2025

Arbeit entstanden in Zusammenarbeit mit dem

Beratungs- und Schulungsinstitut für Tierschutz bei Transport und Schlachtung
(bsi Schwarzenbek)

im Rahmen des Forschungsvorhabens „BolzenSchlüsselRind“

Leitung des Forschungsvorhabens: Dr. Karen von Holleben

Die Förderung des Vorhabens erfolgte aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgte über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Erweiterte Literaturübersicht.....	3
2.1	Rechtlicher Hintergrund	3
2.1.1	Verordnung (EG) Nr. 1099/2009 über den Schutz von Tieren zum Zeitpunkt der Tötung	3
2.1.2	Tierschutz-Schlachtverordnung (TierSchIV).....	4
2.1.3	Tierschutzgesetz (TierSchG)	4
2.1.4	Arbeitsschutzrechtliche Bestimmungen	5
2.1.4.1	Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG).....	5
2.1.4.2	Arbeiten in der Fleischwirtschaft (BGR 229).....	6
2.2	Bolzenschussbetäubung	6
2.2.1	Funktionsweise und Gerätetypen	6
2.2.2	Gerätespezifische Schlüsselparameter.....	8
2.2.3	Schussposition	9
2.2.4	Wirkweise einer Bolzenschussbetäubung.....	10
2.2.5	Bewertung der Betäubungseffektivität	12
2.3	Aufbau und Funktion von Hirnarealen	16
2.3.1	Kontrolle der Motorik	16
2.3.2	Bewusstsein	17

2.3.3	Grundlagen der Schmerzwahrnehmung.....	18
2.3.4	Spinale Reflexe.....	18
2.4	Tod und Todeseintritt.....	19
2.4.1	Hirntod	22
2.4.2	Bewegungen bei diagnostiziertem Hirntod	23
3	Tiere, Material und Methoden	26
3.1	Durchführung der Untersuchungen.....	27
3.2	Erweiterte Beschreibung der untersuchten Tiere	28
3.3	Erweiterte Beschreibung der Bewegungserfassung.....	29
3.4	Erweiterte Beschreibung der Ermittlung von Schussposition und Winkel.....	31
3.4.1	Erhebung des Schusswinkels	31
3.4.2	Erhebung der Schussposition	32
3.5	Erweiterte Beschreibung zur Erhebung der gerätebezogenen Schlüsselparameter	33
3.5.1	Methode 1 (Stun Tester-Methode und Steckschaum-Methode).....	33
3.5.2	Methode 2 (Hochgeschwindigkeitskamera).....	35
3.6	Statistik.....	38
4	Publizierte Studienergebnisse.....	39
5	Erweiterte Studienergebnisse	62
5.1	Erweiterte Einflussfaktoren auf Bewegungen bei Rindern nach Bolzenschuss ...	62

5.1.1	Einfluss prozesstechnischer Parameter auf die Bewegungen.....	62
5.1.1.1	Schlachtbetrieb	62
5.1.1.2	Betäubende Person	64
5.1.1.3	Saison.....	67
5.1.2	Einfluss tierbezogener Parameter auf die Bewegungen.....	68
5.1.2.1	Alter	68
5.1.2.2	Behornung	69
5.2	Überprüfung des Schussansatzes.....	70
5.2.1	Positionsabweichungen	70
5.2.2	Winkelabweichungen.....	73
5.3	Überprüfung und Messung gerätebezogener Schlüsselparameter	76
5.3.1	Erfassung der Austrittslänge	78
5.3.2	Erfassung der Geschwindigkeit	82
5.3.3	Berechnung der kinetischen Energie	85
6	Erweiterte Diskussion	89
6.1	Überprüfung des Schussansatzes.....	89
6.2	Überprüfung und Messung gerätebezogener Schlüsselparameter	92
6.2.1	Austrittslänge des Bolzens	93
6.2.2	Bolzensgeschwindigkeit	94
6.2.3	Herstellerangaben zu Austrittslänge und Bolzensgeschwindigkeit.....	96

6.2.4	Kinetische Energie	96
6.3	Bewegungen und Zeitpunkt des Todes	98
7	Schlussfolgerung	102
8	Zusammenfassung	105
9	Summary	109
10	Erweitertes Literaturverzeichnis	113
11	Anhang	121
11.1	Abbildungsverzeichnis	121
11.2	Tabellenverzeichnis	124
11.3	Abkürzungsverzeichnis	126
12	Danksagung	129

1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten hat der Aspekt einer tierschutzgerechten Schlachtung von Nutztieren erheblich an Relevanz gewonnen. Der Tierwohlgedanke nimmt nicht nur im Hinblick auf die Tierhaltung, sondern auch im Hinblick auf die Schlachtung kontinuierlich an Bedeutung zu und findet immer größeres Interesse seitens der Verbraucher. Die Optimierung der Betäubung hat daher einen besonders hohen Stellenwert. Bei der Rinderschlachtung wird in der Regel die Betäubung mittels Bolzenschuss durchgeführt. Das Ziel einer bestmöglich durchgeführten Bolzenschussbetäubung liegt darin, beim Tier mit dem ersten Schuss eine tiefe irreversible Wahrnehmungs- und Empfindungslosigkeit hervorzurufen, um ihm potenzielle Schmerzen und Leiden während des Schlachtvorgangs zu ersparen. Die Art und Weise der Durchführung der Betäubung hat somit direkten Einfluss auf den Tierschutz.

Trotz der langjährigen Verwendung der Bolzenschussbetäubung bei der handwerklichen und industriellen Schlachtung bestehen nach wie vor Unsicherheiten hinsichtlich der Bewertung der Betäubungseffektivität und der Anforderungen an die Schussgeräte. Insbesondere die regelmäßig auftretenden Bewegungen nach der Betäubung und während der Entblutung führen wiederholt zu Diskussionen und werfen Fragen zu Tier- und Arbeitsschutz auf. Die zunehmende Nutzung von Videoüberwachung an Schlachtbetrieben und das wachsende öffentliche Interesse lenken die Aufmerksamkeit verstärkt auf diese Bewegungen und sind häufig Anlass für Diskussionen.

Durch das variable Erscheinungsbild der zu betäubenden Rinder und die großen Unterschiede hinsichtlich Fixierungsart und Schlachtgeschwindigkeit entstehen hohe Anforderungen an die Hersteller von Bolzenschussgeräten. Dies erklärt die Diversität an Gerätetypen und Ladungsstärken auf dem Markt. In Übereinstimmung mit der Verordnung 1099/2009 (2009) obliegt es den Herstellern, die für den Betäubungserfolg ausschlaggebenden Schlüsselparameter, in ihren Bedienungsanleitungen darzulegen. Gleichwohl besteht Unklarheit darüber, durch welche Methoden die vorgegebenen

Schlüsselparameter am besten zu definieren und zu erfassen sind und welche Kriterien durch unterschiedliche Kombinationen an Schlüsselparametern für die jeweilige Tierkategorie bei der Betäubung erfüllt werden müssen.

Ein Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, durch umfassende Untersuchung der genannten Bewegungen bei Rindern nach Bolzenschussbetäubung und durch Analyse ihrer Einflussfaktoren, ein besseres Verständnis für die auftretenden Bewegungen zu entwickeln. Zudem wird der Aspekt des Schussansatzes bei Rindern beleuchtet, der einerseits maßgeblich die Wirksamkeit der Betäubung beeinflusst und andererseits auch Auswirkungen auf die Bewegungen nach dem Schuss hat (Oliveira et al. 2018b). Des Weiteren werden eigene Messergebnisse zu den gerätespezifischen Schlüsselparametern für diverse Bolzenschussgeräte analysiert, um darauf aufbauend Empfehlungen für eine optimale Anwendung abzuleiten.

Die Erkenntnisse dieser Untersuchungen sollen dazu beitragen, die Hintergründe der Bolzenschussbetäubung zu beleuchten und die Anwendung zu optimieren. Durch die Verbindung von Forschung und Praxis kann diese Arbeit einen Beitrag zur Verbesserung des Schlachtprozesses und des Tierschutzes leisten.

2 Erweiterte Literaturübersicht

2.1 Rechtlicher Hintergrund

Eine Reihe von Rechtsgrundlagen finden in Deutschland während der Schlachtung Anwendung. Auf einzelne davon, welche sich insbesondere mit dem Tierschutz beschäftigen, wird im Folgenden eingegangen.

2.1.1 Verordnung (EG) Nr. 1099/2009 über den Schutz von Tieren zum Zeitpunkt der Tötung

Die Verordnung (EG) Nr. 1099/2009 des Rates vom 24. September 2009 ist seit dem 01. Januar 2013 in Kraft und gewährleistet eine einheitliche Umsetzung des Tierschutzes bei der Schlachtung in allen Mitgliedsländern der Europäischen Union. In den Erwägungsgründen der genannten Verordnung wird der Tierschutz als Gemeinschaftswert beschrieben, da der Schutz der Tiere zum Zeitpunkt der Tötung und Schlachtung im Interesse der Allgemeinheit liegt und deren Verbesserung außerdem zur Optimierung der Fleischqualität beiträgt als auch einen positiven Einfluss auf die Sicherheit am Arbeitsplatz im Schlachthof hat.

Entsprechend Artikel 4 (VO (EG) Nr. 1099/2009 2009) muss vor der Tötung der Tiere eine Betäubung erfolgen, deren Wirkung bis zum Eintritt des Todes anhalten soll. Zudem dürfen Tiere nur mit den in Anhang I für die jeweilige Tierart aufgeführten Verfahren und unter Einhaltung der speziellen Anforderungen in Bezug auf die Anwendung dieser Verfahren betäubt werden. Hierfür müssen die Hersteller gemäß Artikel 8 Gebrauchsanweisungen für die Betäubungsgeräte bereitstellen, in denen die Eignung und Kapazität des jeweiligen Gerätes sowie die Schlüsselparameter gem. Anh. I Kap. I beschrieben werden. Bezogen auf den penetrierenden Bolzenschuss, sind diese Schlüsselparameter Ansatzstelle und Schlagrichtung, geeignete Geschwindigkeit, Austrittslänge und Durchmesser des Bolzens, sowie die Höchstzeit zwischen Betäuben und Entbluten. Die vom Hersteller angegebenen Schlüsselparameter sind auch in die Standardarbeitsanweisungen der Schlachtbetriebe zu

übernehmen (Artikel 6, Nr. 2a). Der penetrierende Bolzenschuss soll zu einer schwerwiegenden und irreversiblen Schädigung des Gehirns führen, hervorgerufen durch den Bolzen, der auf das Schädeldach aufschlägt und dieses durchdringt. Entsprechend Anhang III Nr. 3.2 darf ein weiteres Zurichten erst erfolgen nachdem überprüft wurde, dass keine Lebenszeichen mehr an dem Tier feststellbar sind.

2.1.2 Tierschutz-Schlachtverordnung (TierSchIV)

Auf nationaler Ebene regelt die Verordnung zum Schutz von Tieren im Zusammenhang mit der Schlachtung oder Tötung und zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 1099/2009 des Rates (Tierschutz-Schlachtverordnung – TierSchIV) vom 20. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2.982) die Anforderungen an eine tierschutzgerechte Schlachtung bzw. Tötung. Auch hier wird darauf hingewiesen, dass die Tiere schnell und unter Vermeidung von Schmerzen oder Leiden in einen bis zum Tod anhaltenden Zustand der Wahrnehmungs- und Empfindungslosigkeit versetzt werden sollen (§ 12 Absatz 1). Um dies zu gewährleisten, muss gemäß Absatz 6 (§12) die in Anlage 2 festgelegten Zeitspannen zwischen Betäuben und Entbluten eingehalten werden. Diese beträgt bei mit Bolzenschuss betäubten Rindern maximal 60 Sekunden (Anlage 2 (zu §12 Absatz 6)). Des Weiteren wird in §12 Absatz 7 darauf hingewiesen, dass ein weiteres Zurichten oder Brühen erst erfolgen darf, wenn keine Bewegungen des betäubten Tieres mehr wahrnehmbar sind. Hinsichtlich des bestimmungsgemäßen Gebrauchs des penetrierenden Bolzenschusses weist die Verordnung in Anlage 1 Nr. 1 darauf hin, dass die Größe und Auftreffenergie des Bolzens beim Ansetzen so bemessen sein müssen, dass der Bolzen mit Sicherheit in das Gehirn eindringt. Die Anwendung eines nicht penetrierenden Bolzenschussgerätes zum Zwecke der Betäubung ist somit bei Rindern nicht erlaubt.

2.1.3 Tierschutzgesetz (TierSchG)

Das Tierschutzgesetz (TierSchG 2006) in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. Mai 2006 (BGBl. I S. 1206, 1313), zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 20 des Gesetzes vom 20. Dezember 2022 (BGBl. I S. 2752), beruht verfassungsrechtlich auf dem Staatsziel des

Tierschutzes, welches seit dem 17. Mai 2002 in Artikel 20a des Grundgesetzes verankert ist. Zweck des Gesetzes ist es, das Leben und Wohlbefinden der Tiere zu schützen, indem beispielweise in §1 festlegt wird, dass niemand ohne einen vernünftigen Grund einem Tier Schmerzen, Leiden oder Schäden zufügen darf. In Abschnitt 3 §4 über das Töten von Wirbeltieren wird darauf verwiesen, dass ein Tier nur unter Betäubung bzw. unter Vermeidung von Schmerzen getötet werden darf. Der §4a führt dies für die Schlachtung genauer aus, indem er fordert, dass ein warmblütiges Tier vor dem Blutentzug immer betäubt werden muss. Die ausführenden Personen dürfen dies nur, wenn sie über die dazu notwendigen Kenntnisse und Fähigkeiten verfügen.

2.1.4 Arbeitsschutzrechtliche Bestimmungen

Aufgrund des im Artikel 2 Nr. 2 des Grundgesetzes festgelegtem Recht auf körperliche Unversehrtheit eines Jeden, dient das Arbeitsschutzgesetz der Sicherheit und dem Gesundheitsschutz sowie der Verhütung von Unfällen bei der Arbeit.

2.1.4.1 Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG)

Das Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG) vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 31. Mai 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 140), dient gemäß § 1 dazu, durch Maßnahmen des Arbeitsschutzes und der menschengerechten Gestaltung des Arbeitsplatzes, die Sicherheit der Beschäftigten zu gewährleisten. Zu den Grundpflichten des Arbeitgebenden gehört es, die erforderlichen Maßnahmen des Arbeitsschutzes für die Sicherheit der Beschäftigten zu treffen (§3). Entsprechend §4 muss dieser dafür die Arbeit so gestalten, dass eine Gefährdung für das Leben sowie die physische Gesundheit der Arbeitenden möglichst vermieden und die verbleibende Gefährdung geringgehalten wird. Gefahren sind an ihrem Ursprung zu beseitigen, während individuelle Schutzmaßnahmen nachrangig zu anderen Maßnahmen sind.

2.1.4.2 Arbeiten in der Fleischwirtschaft (BGR 229)

In den vom Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften und dem Fachausschuss „Fleischwirtschaft“ der BGZ (Berufsgenossenschaftliche Zentrale für Sicherheit und Gesundheit) veröffentlichten Berufsgenossenschaftlichen Regeln für Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit in der Fleischwirtschaft (BG-Regeln 229) vom April 2004, werden Inhalte aus dem Arbeitsschutzgesetz, der Unfallverhütungsvorschrift, technische Anforderungen sowie Erfahrungen aus der berufsgenossenschaftlichen Präventionsarbeit ausgeführt.

Kapitel 3.2.3 beschreibt dazu, wie das Unfallrisiko bei der Rinderbetäubung reduziert werden soll. Unter anderem wird vorgegeben, dass vor weiteren Arbeiten am Tier nach der Betäubung, Reflexbewegungen betäubter Rinder unterbunden werden müssen. Entsprechend der BGR wird dies durch eine Elektroimmobilisation der Rinder auf dem Auswurfrost erreicht. Das Anschlingen des Hinterbeins sollte erst nach vollständigem Abklingen der Hinterbeinreflexe erfolgen. Beim Aufziehen soll auf Restreflexe der Vorderbeine geachtet werden.

2.2 Bolzenschussbetäubung

Die Betäubung mittels Bolzenschuss findet bei allen Tierarten Anwendung. Im Falle der Rinderschlachtung ist dies weltweit die am häufigsten eingesetzte Betäubungsmethode.

2.2.1 Funktionsweise und Gerätetypen

Nach Verordnung (EG) Nr. 1099/2009 des Rates vom 24. September 2009 über den Schutz von Tieren zum Zeitpunkt der Tötung Anhang 1, Kapitel 1 werden zwei verschiedene Methoden der Bolzenschussbetäubung unterschieden. Beide haben eine starke Gehirnerschütterung zum Ziel, welche zum Verlust der Wahrnehmungs- und Empfindungsfähigkeit führt (EFSA 2004). Zum einen wird der nicht penetrierende Bolzenschuss genannt, welcher durch einen stumpf auf den Schädel auftreffenden, meist pilzförmigen Bolzen, eine schwerwiegende Gehirnerschütterung verursacht. Zum anderen

ist der penetrierende Bolzenschuss aufgeführt, bei dem der Bolzen das Schädeldach durchbricht und zusammen mit einem ausgestanzten Knochenfragment, welches er vor sich herschiebt, in das Gehirn eindringt, wodurch es zusätzlich zu einer irreversiblen Schädigung von Hirngewebe kommt (Finnie 1993). Aufgrund der fehlenden irreversiblen Schädigung durch einen nicht penetrierenden Bolzen, bietet diese Methode deutlich weniger Sicherheit, weshalb sie in Deutschland bei Rindern nicht angewandt werden darf (Endres 2005, Tierschutz-Schlachtverordnung 2012).

Je nach Ausprägung und Lokalisation der durch den Bolzen herbeigeführten Schäden, kann auch die alleinige Anwendung eines penetrierenden Bolzenschussgerätes zum Tod des Tieres führen (Algers et al. 2007, Grandin 2012, Lamboojij et al. 2016). Da dies aber nicht sicher gewährleistet werden kann, muss zeitnah nach dem Schuss eine schwallartige Entblutung erfolgen, um den Tod des Tieres herbeizuführen (VO (EG) Nr.1099/2009 2009).

Hinsichtlich der Antriebsform unterscheidet man beim penetrierenden Bolzenschuss grundsätzlich zwei Funktionstypen, welche beide in deutschen Schlachtbetrieben eingesetzt werden.

Dazu zählen pneumatisch betriebene Schussapparate, die an einen Kompressor mit einem anliegenden Druck zwischen 13,0 bar und 17,0 bar angeschlossen werden. Diese Funktionsart wird insbesondere an Schlachtbetrieben mit hoher stündlicher Schlachtleistung verwendet, da sie kein zeitaufwändiges Nachladen einer Patrone erfordern. Außerdem ist die Anwendung dieser schweren und ausladenden Geräte an eine enge Fixierung des Kopfes in alle Richtungen gebunden, damit ein gezielter Ansatz sicher ermöglicht wird (VO (EG) Nr.1099/2009 2009, LAV 2021). Dies setzt in der Regel die Verwendung moderner und aufwändiger Fixierungsboxen in den Schlachtbetrieben voraus.

Der zweite Funktionstyp arbeitet mittels Treibladung in Form von Kartuschen, die über einen Schlagbolzen gezündet werden. Diese Geräte sind leichter und handlicher als pneumatisch betriebene Bolzenschussgeräte, weshalb eine enge Fixierung des Kopfes während des Ansetzens bei einem geübten Schützen nicht zwingend erforderlich ist (Grandin et al.

2020). Das erste Bolzenschussgerät für die Betäubung von Rindern wurde 1920 von der Firma Schermer® entwickelt (Ilgert 1985, Drawer 1987, Maennl 1994). Mittlerweile gibt es eine Vielzahl von Herstellern, welche die Geräte weiterentwickeln, dabei jedoch das eigentliche Funktionsprinzip beibehalten haben.

Ein mit Treibladung betriebenes Bolzenschussgerät besteht aus einem Kopfstück mit Zündbolzen, Spannhebel und Auslöser. Dieses wird auf einen Zylinder mit Kartuschenlager geschraubt, in dem der eigentliche Bolzen verankert ist. Kommt es nun durch das Auslösen des Zündbolzens zum Explodieren der Treibladung in der Kartusche, überträgt sich die dabei freiwerdende Energie (E_{norm}) auf den Bolzen, der aus dem Führungsrohr herausgetrieben wird. Je nach Modell wird er dabei von einer unterschiedlichen Zahl an Gummipuffern, Elastomeren oder einer Rückholfeder abgebremst. Deren Ausführung ist ausschlaggebend dafür, ob der Bolzen nach dem Schuss außerhalb des Führungsrohrs verbleibt oder wieder gänzlich durch die Gummipuffer oder Rückholfeder in das Führungsrohr zurückgezogen wird. Das Gerät ist erst nach erneutem Laden wieder schussbereit.

2.2.2 Gerätespezifische Schlüsselparameter

Für eine optimale Funktion der Bolzenschussgeräte ist es zum einen notwendig, die Geräte regelmäßig auf Funktionsfähigkeit hin zu überprüfen und zu reinigen (von Wenzlawowicz et al. 2012, Gibson et al. 2015). Zum anderen müssen die Geräte, die für die jeweilig zu betäubende Tierart und Kategorie geeigneten Eigenschaften und Schlüsselparameter aufweisen. Die in der VO (EG) Nr.1099/2009 (2009) genannten gerätebezogenen Schlüsselparameter für den penetrierenden Bolzenschuss, die Einfluss auf die Effektivität der Betäubung und den Schweregrad der Gehirnerschütterung haben, sind Geschwindigkeit, Durchmesser und Austrittslänge des Bolzens (EFSA 2020).

Da ein Teil der aus der explodierenden Kartusche freiwerdenden Energie als Wärme und Gasdruck verloren geht, ist die Energie des Bolzens, mit der dieser auf den Schädel auftrifft und in das Gehirn eindringt (E_{kin}) geringer als die von der Treibladung ursprünglich

produzierte Energie (E_{norm}). Die Differenz zwischen der produzierten Energie (E_{norm}) und der kinetischen Energie (E_{kin}) wird als Wirkungsgrad bezeichnet (η) und ist umso höher, je geringer der Energieverlust bei der Übertragung ist. Die kinetische Energie (E_{kin}) des Bolzens ist abhängig von der Masse (m) und insbesondere der Geschwindigkeit (v) des Bolzens, welche quadratisch eingeht (Paulsen et al. 2001, Paulsen et al. 2003, TROEGER 2010) und lässt sich mit folgender Formel berechnen: $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} * m * v^2$

Die Geschwindigkeit des Bolzens lässt sich durch die Ladungsstärke der Kartusche oder den anliegenden Luftdruck an das jeweils zu betäubende Tier anpassen, während die Masse des Bolzens in der Regel bei jedem Gerätemodell unveränderlich ist (Oliveira et al. 2018b). Die in der VO (EG) Nr. 1099/2009 (2009) genannten Schlüsselparameter Durchmesser und Austrittslänge beeinflussen die Masse des Bolzens, wobei zu beachten ist, dass die Bolzenmasse bei pneumatischen Geräten vergleichsweise deutlich größer ist als bei ladungsbetriebenen Geräten.

In der Literatur gibt es nur einzelne Angaben zu geeigneter Austrittslänge, Geschwindigkeit und kinetischer Energie, die eine ausreichende Schädigung tiefliegender Hirnstrukturen verursachen und somit für eine effektive Betäubung von Rindern entscheidend sind. Daly et al. (1987) nennt eine Mindestgeschwindigkeit von 55 m/s (AVMA et al. 2016) für ladungsbetriebene Geräte. Für Tiere mit einem Lebendgewicht über 650 kg werden sogar Mindestwerte von 72 m/s (Gregory 1998, AVMA et al. 2016) angegeben. Die EFSA (2020) empfiehlt als minimalen Durchmesser 7 mm und mindestens 90 mm für die Austrittslänge. Geräte mit längerer Austrittslänge führen zu mehr Schäden in tiefliegenden Hirnstrukturen (Martin et al. 2018, Kline et al. 2019) und werden insbesondere bei der Betäubung schwerer Bullen genutzt. Für die kinetische Energie werden Mindestwerte zwischen 200 J bis 300 J empfohlen (Daly et al. 1987, Paulsen 2001, Paulsen et al. 2003).

2.2.3 Schussposition

Um einen ausreichenden Betäubungserfolg zu erzielen, muss der Bolzen in das Gehirn eindringen (Tierschutz-Schlachtverordnung 2012). Bei Rindern erfolgt die Schussrichtung

dazu senkrecht zur Stirn, sodass der Bolzen in Richtung Hirnstamm zielt (Finnie 1993). Dafür muss der Ansatz am Vorderkopf erfolgen (Tierschutz-Schlachtverordnung 2012). Der Ansatz am Hinterkopf ist verboten und wird lediglich für kleine Wiederkäuer genannt, da dort der Ansatz hinter den Hörnern erfolgt. Die Gefahr besteht hier jedoch darin, lediglich das Rückenmark zu treffen und nicht das Gehirn (Gregory et al. 2009). Unter Berücksichtigung der anatomischen Bedingungen wird der empirisch ermittelte Ansatzpunkt in der Literatur mit dem Kreuzungspunkt zweier gedachter Linien zwischen Augenmitte und der kontralateralen Hornmitte angegeben (Ilgert 1985, Gregory 1998, von Holleben et al. 2002, AVMA et al. 2016). Kohlen (2011) empfiehlt nach Untersuchungen an Schädeln ohne klinische Beurteilung der Betäubungseffektivität eine Anpassung dieses Punktes um 1,25 cm in kaudale Richtung, was ebenfalls von der TVT (2018) und Gilliam et al. (2023) befürwortet wird. Abweichungen vom idealen Ansatzpunkt um bis zu 2 cm können bei Verwendung ausreichend starker und gut gewarteter Geräte toleriert werden (Lambooi et al. 1981, Vecerek et al. 2020). Wird der Ansatz zu hoch gewählt, wird lediglich das Kleinhirn durch den Bolzen penetriert. Bei zu niedrigem Ansatz hingegen wird nur der frontale Cortex beschädigt, was die Gefahr einer nicht ausreichenden Betäubungseffektivität erhöht (Grandin 2010). Bei Rindern mit ausgeprägter Crista sagittalis wird empfohlen, den Bolzen 1 cm lateral des oben beschriebenen Punktes anzusetzen (Widderich 1990). Eine generelle Festlegung auf einen bestimmten Ansatzpunkt ist jedoch aufgrund der variablen Schädelnformen, bei unterschiedlichen Rassen und Geschlechtern problematisch (Kohlen 2011).

2.2.4 Wirkweise einer Bolzenschussbetäubung

Nach Auslösen des Bolzenschussgerätes kommt es innerhalb von weniger als 2 ms zu einem sofortigen Verlust der Empfindungs- und Wahrnehmungsfähigkeit durch eine Gehirnerschütterung (Commotio cerebri). Damit ist dieses Verfahren das schnellste und bei korrekter Durchführung auch das wirksamste Betäubungsverfahren bei der Rinderschlachtung (Daly et al. 1987, Schütt-Abraham et al. 2002, EFSA 2004).

Es gibt 4 verschiedene biomechanische Prozesse, die bei einer Gehirnerschütterung eine Rolle spielen (Shaw 2002).

- Der gewaltsame Zusammenstoß von Gehirnparenchym und der knöchernen Schädelhöhle, was zu einer Gehirnprellung (Contusio cerebri) führt (1)
- Der Zug an Neuronen des Hirnstamms aufgrund von Bewegungen der Hemisphären (2)
- Deformation des Hirngewebes durch den darüberliegenden verletzten Schädelknochen (3) und
- die Beschleunigung des Kopfes um die Halsachse (4).

Die vom Bolzen transferierte kinetische Energie auf das Schädeldach und das Gehirn bewirkt eine Beschleunigung des Gehirns, was einen gewaltsamen Aufprall auf den Knochen zufolge hat und zu einer Deformation, Distorsion und Kompression des Nervengewebes führt (Shaw 2002). Die Hauptursachen für die Verletzungen sind dabei der Coup Effekt, welcher mit einem Trauma am Aufprallort einhergeht und der Contre-Coup Effekt, der traumatische Auswirkungen auf der gegenüberliegenden Seite beschreibt (Vandeveldt et al. 2001). Durch das Eindringen des Bolzens in das Gehirn kommt es zu Laceration und Kontusion von Hirngewebe im Bereich des Schusskanals (Moje 2001). Die Tiefe des auch makroskopisch sichtbaren Wundkanals ist abhängig von der kinetischen Energie und der Austrittslänge des Bolzens. Auch im umliegenden Gewebe bewirken die plötzlichen Druckveränderungen, durch das Ein und Ausdringen des Bolzens ins Cavum cranii, eine Ruptur kleinerer Blutgefäße und Nervenbahnen, wodurch auch tiefer liegende Hirnareale geschädigt werden. Es kommt zu einer vermehrten Hämatombildung im Bereich des Wundkanals, des Subarachnoidalraums, der Ventrikel und der Hirnbasis (EFSA 2020).

Algers et al. (2007) stellten bei Untersuchungen fest, dass Bullen, bei denen eine ausgeprägte Hämatombildung im Bereich des Hirnstamms und der Hirnbasis zu finden war, in jedem Fall ausreichend gut betäubt waren. Durch die irreversible Schädigung

tiefliedender Hirnareale (Hirnstamm), kommt es zu einer anhaltenden tiefen Betäubung, welche sich u.a. durch den Funktionsverlust der Hirnnerven und den Verlust der Stehfähigkeit bemerkbar macht (Gregory 1998, Schütt-Abraham et al. 2002). Ziel einer ausreichend tiefen Betäubung sollte es zudem immer sein, dass Asphyxiestadium (IV) zu erreichen, welches mit dem Verlust aller Reflexe und Atemstillstand einhergeht (Werner 2011). Da die Wirkung der Gehirnerschütterung mit der Zeit nachlässt und die irreversiblen Schäden durch den Bolzen unterschiedlich stark ausfallen können, sollte die Entblutung so schnell wie möglich, gemäß TierSchIV maximal 60 Sekunden, nach erfolgter Betäubung und schwallartig mittels Bruststich ausgeführt werden (Tierschutz-Schlachtverordnung 2012). Dies hat zur Folge, dass dem Körper und insbesondere dem Gehirn rasch der Sauerstoff entzogen wird. Die dadurch bedingte Ischämie führt zu einer vermehrten Laktatbildung. Eine nervenschädigende Azidose ist die Folge, wodurch die Bewusstlosigkeit erhalten bleibt (Hilsenbeck 2007, Adams et al. 2008, von Wenzlawowicz et al. 2012, Schwarz 2015, Terlouw et al. 2016a).

2.2.5 Bewertung der Betäubungseffektivität

Im Folgenden wird der Einfachheit halber anstelle von „Empfindungs- und Wahrnehmungsfähigkeit“ analog dem englischen „consciousness“ der Begriff „Bewusstsein“ verwendet.

Die AVMA et al. (2020) definiert Bewusstsein anhand der folgenden sechs Indikatoren: aufrechte Körperhaltung, Aufrichtreflex des Körpers oder Kopfes, Vokalisation, spontaner Lidschluss, gerichtete Augenbewegungen und positive Drohanwort. Das Fehlen von Kornealreflex, Lidreflex und rhythmischen Atembewegungen sind wiederum gleichbedeutend mit einer ausreichend tiefen Betäubung oder Hirntod.

Unter Bewusstseinsverlust ist ein temporärer oder anhaltender Verlust von Hirnfunktionen zu verstehen, welcher mit einer Unempfindlichkeit gegenüber Reizen, wie zum Beispiel Schmerz einhergeht (Blackmore 1989, EFSA 2006, Hemsworth et al. 2009). Gemäß der Definition der AVMA et al. (2020) bezeichnet Bewusstlosigkeit den Verlust der Fähigkeit des

Gehirns, Informationen zu integrieren. Tritt Bewusstlosigkeit bei Rindern nicht allmählich, sondern abrupt ein, wie im Falle der Bolzenschussbetäubung, gehören zu den Anzeichen von Bewusstlosigkeit ein sofortiger Verlust der Körperhaltung (Kollaps), ein tonischer Krampf, der sich nach einigen Sekunden in klonische Krämpfe fortsetzt, gefolgt von Bewegungen der Hintergliedmaßen mit zunehmender Frequenz.

Grundsätzlich sollte die Wirksamkeit der Betäubung während des Schlachtprozesses an mindestens vier Positionen überprüft werden, um sicherzustellen, dass diese bis zum Eintreten des Todes anhält (VO (EG) Nr.1099/2009 2009, EFSA AHAW Panel 2013). Für die Überprüfung der unmittelbaren Wirkung der Betäubung, sollte das Tier direkt nach dem Schuss und, bevor es angeschlungen und aufgezogen wird, kontrolliert werden. Es muss sichergestellt werden, dass das Tier keinerlei Schmerzen mehr wahrnimmt, wenn potenziell schmerzhaft Eingriffe, wie das Hochziehen an einem Bein und der Entblutestich erfolgen. Deshalb sollte auch vor dem Stich eine ausreichende Betäubungswirkung sichergestellt sein. Da die Wirkung der Gehirnerschütterung mit der Zeit nachlässt und die irreversiblen Schäden durch den Bolzen unterschiedlich stark ausfallen können, ist das Tier auch während der Entblutephase und vor weiteren Schlachtarbeiten auf ein Wiedererlangen von Gehirnfunktionen hin zu überwachen (Schwarz 2015).

Bei der Bewertung der Betäubungseffektivität kann es sinnvoll sein, eine Unterscheidung in die drei Kategorien ausreichend betäubt, fraglich betäubt und nicht ausreichend betäubt vorzunehmen (TVT 2020, bsi Schwarzenbek 2023). Bei der Feststellung von Anzeichen einer nicht ausreichenden Betäubungswirkung, sollte in jedem Fall ein Nachschuss erfolgen (bsi Schwarzenbek 2023). Im Falle von fraglichen Symptomen kann ein Sicherheitsschuss erfolgen oder das Tier auf weitere Anzeichen hin intensiv geprüft werden (TVT 2020).

Für die Überprüfung der Betäubungswirkung stehen eine Reihe von Indikatoren zur Verfügung, die während der verschiedenen Kontrollpositionen überprüft werden können. Im Vordergrund steht hier die Überprüfung der Körperhaltung und der Aktivität der Gehirnnerven (Maennl 1994).

In der Literatur wird ein Rind als korrekt betäubt angesehen, wenn es unmittelbar nach dem Schuss niederstürzt, keine Aufrichtversuche mehr zeigt, sich das Auge nach kurzem Wegdrehen zentralisiert, die Pupille sich weitet und Atembewegungen augenblicklich sistieren. Augenreflexe wie Kornealreflex, Lidreflex und Blendreflex sind nicht mehr auslösbar (EFSA AHAW Panel 2013, bsi Schwarzenbek 2023). Der häufig geprüfte Kornealreflex ist der letzte Reflex, der bei anästhesierten Tieren verschwindet und wird deshalb als erstes Anzeichen wiederkehrenden Bewusstseins gewertet (Dugdale et al. 2020). Dennoch muss die Ursache für einen nicht auslösbaren Kornealreflex nicht zwangsweise ein Verlust der Hirnstammfunktion sein. Der zugrundeliegende Reflexbogen kann auch eine alleinige Schädigung im Bereich der afferenten oder efferenten Nerven aufweisen und somit ein falsch negatives Ergebnis liefern. Besonders unmittelbar nach dem Schuss sind diese Nervenfasern häufig noch stark überreizt, weshalb eine Prüfung des Kornealreflexes an dieser Position noch nicht sinnvoll ist (Gregory et al. 2000, bsi Schwarzenbek 2023). Des Weiteren treten unmittelbar nach dem Zusammenstürzen Streckkrämpfe auf (Tonischer Krampf), die sich im weiteren Verlauf in klonische Krämpfe mit unterschiedlichem Erscheinungsbild fortsetzen (Anil 1991, Maennl 1994, EFSA AHAW Panel 2013). Hierbei handelt es sich um ein unkontrolliertes Krampfgeschehen, bedingt durch den Ausfall übergeordneter motorischer Kontrollzentren (Verhoeven et al. 2015). Lamboij et al. (1999) und Terlouw et al. (2015) zufolge sind Krämpfe demnach unvereinbar mit erhaltenem Bewusstsein. Während der hängenden Phase kommt es allmählich zu einem generalisierten Verlust des Muskeltonus und einer zunehmend geraden Rückenlinie. Symptome wie beispielsweise Nystagmus können ein Zeichen dafür sein, dass die Betäubungstiefe abflacht. Andererseits ist dies kein sicheres Zeichen für erhaltenes Bewusstsein. Gleiches gilt auch für das einmalige Auslösen des Kornealreflexes (Gregory et al. 2007, bsi Schwarzenbek 2023).

Weitere mögliche Anzeichen für erhaltenes oder wiederkehrendes Bewusstsein sind fokussierte Augenbewegungen, sowie regelmäßige Atembewegungen (EFSA AHAW Panel 2013, bsi Schwarzenbek 2023), ein erhaltener oder wiederkehrender Ohrtonus sowie

Vokalisation (Grandin 2010, EFSA AHAW Panel 2013, Verhoeven 2016). Abzugrenzen davon sind jedoch Laute, die während des Zusammenstürzens oder während des Krampfgeschehens durch das Herauspressen von Luft aus dem komprimierten Thorax entstehen. Anhaltendes rückwärtiges Aufbiegen an der Entblutebahn ist der Versuch eine normale Körperhaltung einzunehmen (Aufricht- bzw. Labyrinthstellreflex) und somit ein Zeichen für eine nicht ausreichende Betäubungseffektivität (Anil 1991, Grandin 2010, EFSA AHAW Panel 2013). Studien zeigen jedoch, dass Anzeichen wie regelmäßige Atembewegungen oder ein positiver Kornealreflex Aufrichtversuchen des Kopfes vorausgehen (Gregory et al. 1996, McKinstry et al. 2004, Grandin 2015).

Eine weitere Möglichkeit Hirnfunktionen zu prüfen und darzustellen ist mittels EEG (Elektroenzephalogramm). Ein korrekt durchgeführten Bolzenschuss und der damit einhergehende sofortige Verlust der Empfindungs- und Wahrnehmungsfähigkeit zeigt sich auch in den Veränderungen des EEG. Bei zunehmendem Bewusstseinsverlust erhöhen sich die Amplituden der Wellen, während ihre Frequenz abnimmt. Nach der Bolzenschussbetäubung stellen sich die Wellen im EEG im folgenden Verlauf als isoelektrische Linie dar (Nulllinien-EEG), welches mit Bewusstsein unvereinbar und gleichbedeutend mit fehlender Hirnaktivität ist (Daly et al. 1987, Gregory 1998, Verhoeven et al. 2015, Gibson et al. 2019).

Eine Reihe von Faktoren kommen als Ursachen für Nachschüsse bei ungenügender Betäubungstiefe in Frage. Beispiele sind Abweichungen vom empfohlenen Schussansatz durch unzureichende Kopffixierung, mangelndes Geschick der betäubenden Person, ungenügende Wartung der Betäubungsgeräte, Verwendung ungeeigneter Schussgeräte (kurzer Bolzen, zu wenig Energie für die jeweilige Tierkategorie), zu schwache Kartuschenstärke und zu geringer Luftdruck (Ilgert 1985, Grandin 1998, Algers et al. 2007, Marzin et al. 2008, von Holleben et al. 2008, von Wenzlawowicz et al. 2012, Atkinson et al. 2013, Dörfler 2015).

2.3 Aufbau und Funktion von Hirnarealen

Das Gehirn (Encephalon) lässt sich embryonal gesehen in die drei Abschnitte Vorderhirn (Prosencephalon), Mittelhirn (Mesencephalon), Hinterhirn (Metencephalon) und Nachhirn (Medulla oblongata / Myelencephalon) unterteilen (Budras et al. 2006, Trepel 2022). Dem Prosencephalon sind das Telencephalon (Endhirn) und das Diencephalon (Zwischenhirn) zugeordnet. Das Metencephalon bestehend aus Kleinhirn (Cerebellum) und Pons ist ein Teil des Rautenhirns (Rhombencephalon), zu dem auch das Nachhirn (Myelencephalon) gehört. Unter dem Begriff Hirnstamm werden das Mesencephalon, das Metencephalon, mit Ausnahme des Kleinhirns, sowie die Medulla oblongata (Myelencephalon) (Trepel 2022) zusammengefasst. Aus diesem Bereich entspringen unter anderem die Gehirnnerven III (N. oculomotorius) bis XII (N. hypoglossus). Das Regelzentrum für Atmung und Kreislauf liegen im Myelencephalon (Medulla oblongata). Eine anhaltende Störung dieser Regionen kann den Tod zur Folge haben.

2.3.1 Kontrolle der Motorik

Bei der Kontrolle der Motorik sind neben dem Rückenmark auch eine Reihe von Hirnarealen beteiligt. Im Bereich des Endhirns sind dies der primäre motorische Cortex, welcher somatotopisch organisiert ist, der sekundäre motorische Cortex sowie der prämotorische Cortex. Hier werden Informationen vom Parietallappen verarbeitet und die Ausführung von Bewegungen in bestimmten Körperbereichen initiiert (Carlson et al. 2017). Darunter fallen auch komplexe, willkürliche Bewegungen, bei denen unter anderem visuelle Informationen, die Position von Gelenken und Muskeln sowie die Bedürfnisse des Körper integriert werden (Beloozerova et al. 2003, Grandin et al. 2020).

Mithilfe der beiden absteigenden Pyramidenbahnen (Tractus corticospinalis, Tractus corticonuclearis) werden motorische Informationen vom Cortex zu den Muskeln geleitet (Bouvier et al. 2015). Die Pyramidenbahnen spielen unter anderem eine Rolle bei der Kontrolle von automatischen Rumpf- und Gliedmaßenbewegungen sowie bei der Fortbewegung und Erhaltung der Körperhaltung. Weitere motorisch involvierte subcorticale

Strukturen sind das Kleinhirn, die Basalganglien und die *Formatio reticularis*. Das Kleinhirn (*Cerebellum*) dient der Koordination und Regulation bei der Ausführung abgestimmter Bewegungsabläufe und sorgt somit auch für eine Aufrechterhaltung des Gleichgewichts. Die Basalganglien empfangen Informationen vom motorischen Cortex und leiten diese an das Rückenmark weiter. Ihre Funktion liegt unter anderem in der Hemmung unwillkürlicher Bewegungen (Salomon et al. 2008, Carlson et al. 2017, König et al. 2018, Trepel 2022).

Die *Formatio reticularis*, welche sich über den gesamten Hirnstamm erstreckt, reguliert den Muskeltonus und ist involviert bei unwillkürlichen Bewegungen (Grillner et al. 2008).

Ein koordiniertes Aufrichten des Kopfes und des Körpers (*Aufrichtreflex*), als Bestrebung den Kopf in eine tierartphysiologische Position zu bringen, bedingt die Funktionsfähigkeit von Mittelhirn, Pons und Medulla (Grandin 2002, Terlouw et al. 2016a).

2.3.2 *Bewusstsein*

Ein Bestandteil der *Formatio reticularis* ist das retikuläre aktivierende System (RAS), welche sensorische Informationen vom Cortex und anderen subcortikalen Strukturen empfängt und diese an das Rückenmark, den Thalamus und den Cortex weitergibt. Die *Formation Reticularis* ist somit zusammen mit dem Thalamus an der Auswahl ankommender Informationen beteiligt, welche an den Cortex weitergeleitet werden. Der Thalamus, auch „Tor zum Bewusstsein“ genannt, bildet mit dem Cortex eine funktionelle Einheit in Form des thalamokortikalen Systems, welches über den Hirnstamm reguliert wird (Schaible et al. 2010). Informationen aus dem Umfeld werden an dieser Stelle gefiltert und entweder gehemmt oder verstärkt (Carlson et al. 2017). Ein durch Schäden verursachter Funktionsausfall im Bereich des Hirnstamms oder des Thalamus ist somit mit Bewusstsein nicht vereinbar (Gregory et al. 2000, Terlouw et al. 2015, Lambooj et al. 2016). Eine ausschließliche lokale Schädigung des Cortex hingegen bedeuten nicht automatisch Bewusstseinsverlust.

2.3.3 Grundlagen der Schmerz Wahrnehmung

Erst wenn ein Schmerzreiz über die *Formatio reticularis* und die thalamokortikale Bahn (*Tractus thalamocorticales*) an verschiedene Hirnareale wie dem somatosensorischen Cortex weitergeleitet wird, wird der Reiz bewusst als Schmerz interpretiert und wahrgenommen (Carlson et al. 2017). Treten Schäden im Bereich des Hirnstamms und/oder des Thalamus auf, ist eine Weiterleitung des Reizes an den somatosensorischen Cortex und das limbische System gestört, wodurch eine Wahrnehmung des Schmerzes als solches nicht möglich ist (Kitchell et al. 2013).

Das reflexartige Zurückziehen einer Gliedmaße (*Flexion*) als Reaktion auf den Schmerzreiz wird unmittelbar über das Rückenmark generiert, in dessen Hinterhorn der ankommende Impuls vom afferenten Neuron direkt auf das zu den Muskelspindeln ziehende Motoneuron verschaltet wird (Brooks et al. 2005).

Reflexartige Reaktionen auf einen nozizeptiven Reiz, die alleinig vom Rückenmark generiert werden funktionieren somit unabhängig von der Weiterleitung an übergeordnete Gehirnstrukturen und sind demnach nicht an eine bewusste Wahrnehmung des Schmerzreizes geknüpft (Brooks et al. 2005, Carlson et al. 2017).

2.3.4 Spinale Reflexe

Unter spinalen Reflexen werden autonome stereotype Reaktionen auf einen spezifischen Stimulus verstanden, die auf Rückenmarksebene generiert werden und somit unabhängig von der übergeordneten Kontrolle des Gehirns fungieren können (Grillner et al. 2008, Carlson et al. 2017).

Obere motorische Neurone, die ihren Ursprung in der Hirnrinde und im Hirnstamm haben, können über eine Verschaltung durch Interneurone auf das untere motorische Neuron die Reflextätigkeit hemmen. Bei Ausfall des inhibierenden oberen motorischen Neurons, kann es unter anderem zu einer Steigerung der Reflextätigkeit oder Spasmen kommen (Grillner et al. 2008).

Spinale Reflexe können zwar vom Gehirn moduliert werden, funktionieren jedoch auch unabhängig davon. Verhoeven et al. (2015) zeigten in ihrer Studie, dass anästhesierte und somit wahrnehmungsunfähige Schafe auf einen nozizeptiven Reiz am Ohr mit Wegziehen reagierten. Es wird davon ausgegangen, dass diese Reaktion Folge eines nozizeptiven Reflexes war, welche vom Rückenmark ausging.

Terlouw et al. (2016b) zufolge muss zwischen schmerzhaften Stimuli, die eine Beteiligung des Gehirns erfordern und denen, die ausschließlich auf Rückenmarksebene verarbeitet werden, ohne Beteiligung von Bewusstsein unterschieden werden.

Kommt es zu einer gesteigerten Reflexantwort oder einer Übererregbarkeit, spricht man von Hyperreflexie. Diese kann einhergehen mit spastischer Tonuserhöhung und Kloni. Die Ursachen hierfür sind mannigfaltig. Unter anderem kann eine Störung der Pyramidenbahnen ursächlich sein, die normalerweise Muskeleigenreflexe regulieren (Riek 1980, Verhoeven 2016). Eine Schädigung der Pyramidenbahnen im Gehirn kann eine schlaffe Lähmung mit anschließender spastischer Lähmung verursachen.

2.4 Tod und Todeseintritt

Es existieren unterschiedliche Definitionen für den Eintritt des Todes.

Der Uniform Determination of Death Act (UDDA 1981) definiert den Tod als irreversiblen Ausfall von Herz- und Kreislauffunktionen oder irreversiblen Ausfall des gesamten Gehirns inklusive des Hirnstamms (Wijdicks et al. 2010, Lewis et al. 2019).

Eine der häufigsten verwendeten Definitionen für den Tod ist der permanente und irreversible Verlust der kritischen Funktionen des Gesamtorganismus (Bernat 1998). Mit kritischen Funktionen sind an dieser Stelle solche gemeint, ohne die der Organismus als Ganzes nicht funktionieren kann (Atmung, Kreislauf, Neuroendokrine und homöostatische Regulation sowie Bewusstsein). Der irreversible Verlust all dieser Funktionen definiert den Tod (Laureys 2005). Nicht abschließend geklärt ist die Frage, ob der Tod als Prozess oder singuläres Ereignis gesehen werden sollte (Kass 1971, Morison 1971). Es wird hierbei

unterschieden zwischen dem klinischen Tod, der mit dem Sistieren von Atmung und Herzschlag einhergeht, dem Hirntod oder Individualtod, welcher eintritt, wenn alle Hirnfunktionen irreversibel ausgefallen sind und dem biologischen Tod, welcher eintritt, nachdem alle Organ- und Zellfunktionen irreversibel erloschen sind. Die Zeitphase zwischen dem Individualtod und dem biologischen Tod wird auch als intermediäres Leben oder Supravitalphase bezeichnet (Huijun et al. 1999, Baumgärtner et al. 2020). Zur Feststellung des Todes werden in der Veterinärmedizin sogenannte sichere und nicht sichere Todesanzeichen unterschieden. Zu den sicheren Todesanzeichen zählen unter anderem Leichenstarre (Rigor Mortis), Totenflecken (Livor Mortis), Erkalten des Tierkörpers, Autolyse, Verwesung bzw. Leichenfäulnis und Mumifizierung bzw. Skelettierung (Baumgärtner et al. 2020). Keine dieser Merkmale sind mit dem Leben vereinbar. Als unsichere Todesanzeichen gelten unter anderem Atemstillstand, Koma, Pulslosigkeit, nicht wahrnehmbare Herztätigkeit, lichtstarre, geweitete Pupillen, Areflexie, Muskelatonie, blasse Haut und Absinken der Körpertemperatur (Baumgärtner et al. 2020). Keines dieser Anzeichen für sich genommen oder in Kombination, kann als sicheres Anzeichen für den Tod gewertet werden, es sei denn, sie treten zusammen mit schweren Verletzungen auf, von den auszugehen ist, dass sie mit dem Leben unvereinbar sind (Baumgärtner et al. 2020). Im Falle der Schlachtung werden diese mit dem Leben unvereinbaren Schäden durch einen starken Blutverlust hervorgerufen, bei dem zwischen 40,0 % bis 60,0 % des Blutvolumens austreten (Warriss 1984). Gutierrez et al. (2004) berichten, dass bei einem Volumenverlust von mehr als 30,0 % der Blutdruck trotz kardialer und vaskulärer Gegenregulierung nicht mehr aufrechterhalten werden kann.

Die von der europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA AHAW Panel 2013) benannten Anzeichen für die Feststellung des Todes bei einem Rind nach Bolzenschussbetäubung und anschließender effektiver Entblutung¹ sind:

¹ Schwallblutmenge Rind: Rund 4,0 % des Körpergewichtes an Blut in den ersten 30 Sekunden (Jungbullen/Färsen 3,6 %, Kühe 4,7 % LAV, A. T. (2021). Handbuch Tierschutzüberwachung bei der Schlachtung und Tötung, AG Tierschutz LAV.

- Gänzlicher und irreversibler Verlust von Muskeltonus sowie ein Erschlaffen des Körpers
- Anhaltendes Ausbleiben von Atmung, Lid- und Kornealreflex
- Fehlen von Herzschlag und Puls
- Dilatierte Pupille (Mydriasis) als Indikator für den eingetretenen Hirntod als Todesursache

Hervorgerufen wird dieser Zustand durch irreversible Schädigung der respiratorischen und zirkulatorischen Hirnzentren in der Medulla oblongata.

Die American Veterinary Medical Association (AVMA et al. 2020) empfiehlt für die Feststellung des Todes folgende Kriterien zu prüfen: das Ausbleiben von Puls, Atmung und Kornealreflex, sowie eine fehlende Reaktion auf Schmerzreize im Zwischenklauenbereich und das Fehlen von wahrnehmbaren Herztönen, zusammen mit dem Erblassen von Schleimhäuten und dem Einsetzen der Totenstarre. Mit Ausnahme der Totenstarre (Rigor Mortis) ist jedoch keines der Kriterien für sich alleine genommen ein sicheres Anzeichen, um den Tod zu bestätigen, sondern muss immer in Kombination betrachtet werden (AVMA et al. 2020). Die AVMA et al. (2020) gibt aus diesem Grunde vor, dass weitere invasive Schlachtarbeiten im Anschluss an die Entblutung erst erfolgen dürfen, wenn sichergestellt ist, dass das Tier bewusstlos oder der Hirntod eingetreten ist. Dafür müssen die drei Indikatoren Abwesenheit von Kornealreflex, Lidreflex und rhythmischer Atmung überprüft werden.

Terlouw et al. (2016a) definieren Tod mit dem Eintreten des Hirntods. Aufgrund der irreversiblen Schädigung des Gehirns und insbesondere des Hirnstamms in Folge der Bolzenschussbetäubung, ist die Funktionsfähigkeit des Gehirns permanent gestört und somit auch die Aufrechterhaltung der Vitalparameter (Atmung, Kreislauf, Thermoregulation). Dennoch kann die Herzfunktion bei ausbleibender Entblutung noch

weitere 8 bis 10 min. nach Eintreten des Hirntods andauern (Finnie et al. 2002). Ursache hierfür ist der autonome Steuerungsmechanismus des Herzens.

2.4.1 Hirntod

Bezogen auf die Lokalisation des Hirntods unterscheidet man zwischen gesamtem Hirn, Hirnstamm und Neokortikalem Tod (Laureys 2005). Der Tod des gesamten Gehirns und des Hirnstamms sind definiert als das irreversible Ende des Organismus als Ganzes (Laureys 2005). Unabhängig vom betroffenen Bereich wird bei der Überprüfung des Hirntods insbesondere der Funktionsverlust des Hirnstamms über die Funktionen der Hirnnerven getestet (Apnoe Test, Kornealreflex, Schluckreflex, usw.) (Laureys 2005). Die von der American Academy of Neurology formulierten Kriterien für die Feststellung des Hirntods in der Humanmedizin sind im Folgenden aufgezählt (Barclay 1981, Russell et al. 2019).

- Koma
- Bekanntsein der Ursache für das Koma
- Ausschließen von weiteren Faktoren, die den Zustand beeinflussen könnten (Hypothermie, Drogen, endokrine Störungen oder Störungen des Elektrolythaushalts)
- Fehlen von Hirnstammreflexen
- Fehlen von motorischen Reaktionen
- Atemstillstand
- Eine erneute Kontrolle der oben genannten Parameter nach 6 h

Die Ursache des Hirntods kann sowohl primär als auch sekundär sein. Unter einer primären Ursache wird eine direkte Schädigung des Gehirns verstanden, welche durch ein Schädel-Hirn-Traumata, Hirninfarkte oder ausgeprägte intrazerebrale Blutungen hervorgerufen wird.

Sekundäre Hirnschäden sind durch eine Veränderung des Metabolismus bedingt, wie z.B. durch eine Ischämie (Barclay 1981, Russell et al. 2019).

Im Falle der Schlachtung von Rindern, unter Verwendung des Bolzenschusses kann in vielen Fällen von einem kombinierten Hirntod gesprochen werden. Der penetrierende Bolzen verursacht eine primäre Schädigung des Gehirnparenchyms aufgrund eines ausgeprägten Schädel-Hirn-Traumas. Der darauffolgende sekundäre hypoxisch-ischämische Hirnschaden wird zum einen durch die rupturierten intrakraniellen Blutgefäße hervorgerufen, zum anderen durch die anschließende Entblutung mittels Bruststich. Jedoch sind nicht alle Gehirnareale gleich empfindlich gegenüber Hypoxie. Der Cortex reagiert deutlich rascher auf die eintretende Hypoxie als die evolutionär älteren Hirnareale Thalamus und Hirnstamm. Bei einer totalen Unterbrechung der Blutversorgung tritt innerhalb von 3 s bis 10 s Bewusstlosigkeit ein und die mittels EEG gemessene Hirnaktivität beginnt nach 12 s bis 72 s zu stoppen. Bei geschächteten Kälbern wird das Auftreten von isoelektrischen Linien im EEG zwischen 5 s und 336 s nach Setzen des Entblutestichs beschrieben (Gregory et al. 2010, von Holleben 2010). Bei nicht betäubten adulten Rindern trat der Verlust des Bewusstseins nach Setzen des Entblutestichs zwischen 7,5 s und 77 s ein (von Holleben 2010).

2.4.2 Bewegungen bei diagnostiziertem Hirntod

Das Auftreten von Bewegungen z.B. in Form von Streckreflexen wird bei Patienten mit diagnostiziertem Hirntod häufig beschrieben (Downman et al. 1946, Ivan 1973, Jørgensen 1973, Conci et al. 1986, Spittler et al. 2000). Downman et al. (1946) berichtet von spinalen, viszerosomatischen motorischen Reflexen bei dekapitierten Tieren, die während eines chirurgischen Eingriffs beobachtet wurden.

In einer Studie von Wijdicks et al. (2010) wurde ebenfalls der Frage nachgegangen, ob komplexe motorische Bewegungen, die sich irrtümlich als erhaltene Hirnfunktion deuten lassen, bei Patienten mit diagnostiziertem Hirntod vorkommen. Es wurde kein Fall identifiziert, bei dem es nach Diagnosestellung von Hirntod, unter Verwendung der Kriterien

der American Academy of Neurology (Barclay 1981) zu einem Wiederauftreten von Hirnfunktionen kam. Andererseits traten komplexe spontane oder reflexartige motorische Reaktionen in einer Studie bei 55,0 % der Patienten (n= 144) mit diagnostiziertem Hirntod auf. Darunter waren Fingertremor, sich wiederholende Beinbewegungen, Plantarreflex, Gelenkbeugung, undulierende Zehenbeugung und bilaterale Flexionssynergie, welche über einen Zeitraum von bis zu 32 h nach Diagnosestellung dokumentiert wurden (de Freitas et al. 2005, Zubkov et al. 2008).

Saposnik et al. (2014) untersuchten bei 107 Patienten mit Hirntod spinale Reflexe und beobachtete dabei unter anderem folgende Reflextätigkeiten:

- wiederholte Beugung und Streckung der Zehen, ausgelöst durch taktile Stimulation der Fußsohle
- dreifacher Flexionsreflex, (Beugung von Oberschenkel, Bein und Fuß, ausgelöst durch taktile Stimulation der Fußsohle)
- Abdominal Reflex
- tonischer Nackenreflex
- isolierte Zuckungen der oberen Extremitäten
- plantare Reaktion (Plantarflexion, ausgelöst durch plantare Stimulation)
- unilaterale Pronator-Extensionsbewegungen, ausgelöst durch Kopfdrehung
- asymmetrische Opisthotonushaltung des Rumpfes
- Quadrizepskontraktionen, ausgelöst durch lokale Noxenreize
- Lazarus-Zeichen, d. h. beidseitige Armbeugung, Schulteradduktion und Anheben der Hand zum Brust-/Halsbereich, ausgelöst durch Kopfbeugung und Stimulation des Sternums

- Beinbewegungen, die eine periodische Beinbewegung nachahmen

Beobachtet wurden diese Bewegungen bei den Patienten über einen Zeitraum von 24 h nach Diagnosestellung. Die Bewegungen konnten spontan auftreten oder wurden ausgelöst durch passive Manipulation, wie Drücken der Hand oder Setzen eines Schmerzreizes an den Patienten (Saposnik et al. 2014).

3 Tiere, Material und Methoden

Diese Dissertation wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „BolzenSchlüsselRind“ erstellt, welches durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), über den Zeitraum Dezember 2019 bis Februar 2023 gefördert wurde (Fördernummer: 28-1-78.01X-18). Ziel des Projektes war unter anderem die Beschreibung und Standardisierung von Schlüsselparametern der Bolzenschussbetäubung bei Rindern im Hinblick auf unterschiedliche körperliche Merkmale der Tiere (Rasse, Geschlecht, Schlachtkörperklassifizierung). Die Ergebnisse sollten Grundlagen für eine Weiterentwicklung der Geräte und ihrer Optimierung im Hinblick auf den Tierschutz und Arbeitsschutz schaffen. Zudem sollten die Projektergebnisse auch der Entwicklung visueller und technischer Monitoring Verfahren für die Betäubungskontrolle dienen und die Bewertung der Betäubungseffektivität erleichtern. Durch eine möglichst eindeutige Beschreibung unterschiedlich zu wertender Anzeichen am Tier im zeitlichen Verlauf zwischen Betäubung und Tod und mithilfe neuer Tools (Grafiken und Animationen), sollte dies ermöglicht werden.

Diese Dissertation ist Bestandteil des ersten Projektabschnittes, im Rahmen dessen der Status Quo zu Bewegungen nach Bolzenschussbetäubung, zur Betäubungseffektivität und zu den Schlüsselparametern der eingesetzten Schussgeräte an 5 verschiedenen Schlachtbetrieben erhoben wurde und zusätzlich die Schlüsselparameter weiterer gängiger Bolzenschussgeräte erfasst wurden.

Im zweiten und dritten Projektteil wurden der Einfluss der Ausprägung bestimmter Schlüsselparameter und der Einfluss von Elektroimmobilisation nach der Betäubung auf die Bewegungen weiblicher Rinder nach Bolzenschussbetäubung überprüft. Außerdem wurden sowohl die Bewegungen nach Bolzenschussbetäubung beim Rind als auch weitere Anzeichen zur Betäubungseffektivität mittels Visualisierung verdeutlicht (von Holleben et al. 2023): Bewertung der Betäubungseffektivität nach Bolzenschussbetäubung beim Rind - Teil 1). Der zweite und dritte Projektteil wird in dieser Arbeit nicht genauer ausgeführt.

Im Rahmen der Studie wurden keine Verfahren an Tieren durchgeführt, die eine formelle Genehmigung durch eine Ethikkommission erfordern. Alle Datenerhebungen fanden während und nach der routinemäßigen Schlachtung statt, wobei alle Tiere für die Verwendung in der Lebensmittelkette bestimmt waren. Die Beobachtungen wurden ohne jeglichen Eingriff am lebenden Tier durchgeführt. Das Videomaterial wurde in Absprache mit den jeweiligen Schlachtbetrieben und den zuständigen Behörden, sowie unter Genehmigung der beteiligten Mitarbeitenden erstellt.

3.1 Durchführung der Untersuchungen

Die vorliegenden Untersuchungen wurden an 5 mittelgroßen bis großen Rinderschlachtbetrieben in Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Schleswig-Holstein und Bremen durchgeführt. Die Datenerhebung fand an insgesamt 15 verschiedenen Schlachttagen statt und erstreckte sich von Juni 2020 bis März 2021. Insgesamt wurden dafür über 2.911 Rinder während der Betäubung und Entblutung durch zwei bis drei geschulte Untersucher untersucht, die für jedes Tier die Zeit bis zum Stich und die Betäubungseffektivität am Auswurf, während des Aufzugs und Stichs, sowie während der Entblutung erhoben. Die Betäubungseffektivität wurde nach bsi-Standard bewertet (bsi Schwarzenbek 2023). Tiere, deren Betäubungseffektivität als „nicht ausreichend“ bewertet werden, sind dabei nicht per se empfindungs- und wahrnehmungsfähig, es besteht jedoch ein Risiko, dass sie diese Fähigkeiten wiedererlangen.

Zusätzlich zu tier- und betäubungsgerätebezogenen Einflussgrößen, wurden auch prozessbedingte Faktoren erhoben, wie Betrieb, betäubende Person, Art der Kopffixierung und die oben bereits erwähnte Stun-to-Stick Zeit. Der mögliche Einfluss der Jahreszeit (Saison) wurde ebenfalls im statistischen Modell berücksichtigt. Hierfür wurde eine meteorologische Einteilung² verwendet.

² Frühling: 1. März bis 31. Mai; Sommer: 1. Juni–31. August; Herbst: 1. September–30. November; Winter: 1. Dezember–28./29. Februar

3.2 Erweiterte Beschreibung der untersuchten Tiere

Auf allen fünf Betrieben wurden Kühe, Färsen und Mastbullen unterschiedlicher Rassen und Nutzungsgruppen geschlachtet.

Für alle Tiere wurde Ohrmarkennummer, Produktionsgruppe (Kuh, Jungbulle, Färse) Rasse und Vorhandensein von Hörnern im laufenden Prozess erhoben. Die Daten wurden später mit den Informationen der Schlachtlisten und Rinderpässe abgeglichen und durch die Klassifizierungsdaten (Fleisch, Fett), das Alter und das Schlachtgewicht ergänzt. Die genaue Verteilung hinsichtlich der Produktionsgruppen und Rassen lässt sich aus der nachfolgenden Tabelle 1 entnehmen.

Tabelle 1. Verteilung der Rinder nach Produktionsgruppe (Bulle, Färsen Kühe) auf die unterschiedlichen Rassen innerhalb der Stichprobe (N= 2.911)

Rasse	Produktionsgruppe			Gesamt	Gesamtanteil in %
	Bullen	Färsen	Kühe		
Holstein-Schwarzbunt	263	195	721	1.179	40,5 %
Fleckvieh	494	41	11	546	18,8 %
Kreuzung Milchrind x Milchrind	2	2	14	18	18,0 %
Kreuzung Fleischrind x Milchrind	288	121	16	425	14,6 %
Holstein-Rotbunt	50	58	99	207	7,1 %
Kreuzung Fleischrind x Fleischrind	82	31	13	126	4,3 %
Braunvieh	98	1	1	100	3,4 %
Limousin	58	24	10	92	3,2 %
Rotbunt DN	50	9	9	68	2,3 %
Charolais	26	5	14	45	1,6 %
Angus	32	8	2	42	1,4 %
Sonstige Rassen	36	0	2	38	1,3 %
Vorderwälder	6	0	0	6	0,2 %
Angler	3	2	2	7	0,2 %
Weißblaue Belgier	3	0	0	3	0,1 %
Highland Cattle	1	1	0	2	0,1 %
Hereford	0	2	0	2	0,1 %
Galloway	1	0	2	3	0,1 %
Uckermärker	1	0	0	1	0,0 %
Grauvieh	0	1	0	1	0,0 %
Gesamtergebnis	1.494	501	916	2.911	100,0 %
	51,3 %	17,2 %	31,5 %	100,0 %	

3.3 Erweiterte Beschreibung der Bewegungserfassung

Im Vorfeld der Untersuchung fanden zwei Probeuntersuchungen statt, bei denen Videomaterial zu den Bewegungen der Tiere nach der Betäubung gesammelt wurde. Anhand dieses Materials wurden die Definitionen unterschiedlicher Bewegungen nach der

Betäubung erarbeitet, auf die hin die Tiere in den nachfolgenden Untersuchungen analysiert werden sollten (siehe auch Table 4 in Abschnitt 4 „Publizierte Studienergebnisse“). Zu den definierten Bewegungen zählten:

- Schlagen der Hintergliedmaße (hochgradig oder moderat)
- Strecken und Anwinkeln der Hintergliedmaße
- Zappeln mehrerer Gliedmaßen ggf. mit Beteiligung des Rumpfes (hochgradig oder moderat)
- ventrales Krümmen des Rumpfes
- laterales Biegen des Rumpfes
- gestrecktes Anheben der Vordergliedmaßen
- Einrollen der Vordergliedmaßen.

Des Weiteren wurden die Zeiträume, denen die Bewegungen zugeordnet wurden, beschrieben. Der Beobachtungszeitraum erstreckte sich vom Zeitpunkt des Betäubungsschusses in der Fixierungsbox bis hin zu mindestens 4 Minuten nach Setzen des Entblutestichs. Er wurde in die 8 Prozessintervalle Auswurf, Aufzug, Hautstich, Bruststich, und jeweils 1. bis 4. Minute der Entblutung unterteilt.

Um zu erfassen und zu beschreiben welche Bewegungen die Rinder nach der Bolzenschussbetäubung zeigen, wurden an jedem Untersuchungstag mehrere Actionkameras (Apeman A100S, <https://de.apemans.com/collections/action-kamera>) neben dem Auswurf und der Entblutestrecke installiert. Hierbei war darauf zu achten, dass bei allen Tieren der gesamte Körper kontinuierlich im Beobachtungszeitraum erfasst werden konnte.

Während eines Untersuchungstages mussten die Kameras ca. 4-6 h in Betrieb sein. Um einer durch die lange Laufzeit bedingte Überhitzung der Kameras vorzubeugen, wurden alle Kameras mit externen Power Banks (Anker 537 Power Bank, Anker Technology, Birmingham, UK) betrieben.

Das Videomaterial wurde hinsichtlich Quantität, Qualität und zeitlicher Einordnung der beobachteten Bewegungen in den Prozessintervallen ausgewertet. Jeder Bewegung wurde entsprechend ihrer Intensität ein „Score“ zwischen 0,5 und 3 zugeordnet. Die Scores der verschiedenen Bewegungen in einem Prozessintervall ergaben addiert den Score für dieses Intervall, z.B. den Score am Aufzug. Die Scores aller Bewegungen über den gesamten Beobachtungszeitraum (8 Prozessintervalle) hinweg ergaben zusammen addiert den „Summen Score“. Die resultierenden Summen Scores gingen dann als Ergebnisparameter in die statistische Analyse ein.

3.4 Erweiterte Beschreibung der Ermittlung von Schussposition und Winkel

Zusätzlich zur Erfassung der Bewegungen und der Betäubungseffektivität wurden am Ende der Entblutung am hängenden Tier die Schussposition und der Schusswinkel der Bolzenschussbetäubung durch einen geschulten Untersucher ermittelt. Ebenso wurden zusätzliche Schusslöcher und makroskopisch sichtbare anatomische Besonderheiten an der Stirn des Tieres erfasst. Hierzu zählten beispielsweise Umfangsvermehrungen oder eine ausgeprägte Crista mediana.

3.4.1 Erhebung des Schusswinkels

Nachdem Kunststoffsonden (POM-Rundstab, Nattmann GmbH, Willich, NRW, DE) mit unterschiedlichen Durchmessern (8,4 mm oder 12,4 mm, je nach verwendetem Bolzen) einige Zentimeter in das Schussloch eingeführt wurden, konnte der Einschusswinkel zur Stirn mithilfe eines Geodreiecks (Westcott E-10132 00 Geodreieck, Acme United Europe GmbH, Solingen, NRW, DE) ermittelt werden (Abbildung 1). Es wurden Winkelabweichungen in die Richtungen caudal, rostral, links und rechts unterschieden. Die Einteilung der Abweichungen erfolgte in 10 ° Schritten ($\geq 10^\circ$, 20°). Es wurden ausschließlich Winkelabweichungen erhoben, die über 10° von der Senkrechten abwichen.



Abbildung 1. Erfassung der seitlichen Winkelabweichungen des Schussansatzes mittels Kunststoffsonde und Geodreieck am Ende der Entblutestrecke. Bei diesem Tier liegt die ermittelte seitliche Winkelabweichung unter 10° .

3.4.2 Erhebung der Schussposition

Die Position des Schussansatzes wurde mit einem Multi-Winkel-Lineals (Wohao, Shenzen, Guangdong, CN) erhoben. Der von der TVT (2018) empfohlene Ansatz, 1 cm über dem Kreuzungspunkt zwischen Hornmitte und Augenmitte, wurde als optimaler Ausgangspunkt gewählt. Erhoben wurde sowohl der Grad der Abweichungen in 1 cm Schritten von diesem Punkt als auch die Richtung der Positionsabweichung. Für die Beschreibung der Richtungsabweichung diente ein Ziffernblatt, wobei 12 eine caudale Abweichung und 6 eine rostrale Abweichung darstellte (siehe Abbildung 1 und 2). Es wurden nur Abweichungen erhoben, die mindestens 2 cm vom optimalen Ansatz abwichen.



Abbildung 2. Richtungsabweichungen vom optimalen Schusspunkt wurden mithilfe eines gedachten Ziffernblattes (links) und eines Multi-Winkel-Lineals (rechts) am Tierkopf erhoben. Abweichungen wurden in Zentimeterabstand vom optimalen Ansatz (1 cm über einem Kreuzungspunkt zweier gedachter Linien zwischen Augenmitte und Mitte des gegenüberliegenden Hornansatzes) angegeben. Bei diesem Tier wurde der Schusspunkt optimal getroffen.

3.5 Erweiterte Beschreibung zur Erhebung der gerätebezogenen Schlüsselparameter

Auf den beteiligten Schlachtbetrieben wurden verschiedene Bolzenschussgeräte von unterschiedlicher Funktionsart und unterschiedlichem Gerätetyp verwendet (siehe Table 1, Kapitel 4.). Für diese und weitere Geräte wurden im Vorfeld die gerätebezogenen Schlüsselparameter (Austrittslänge, Durchmesser und Geschwindigkeit des Bolzens), sowie das Bolzengewicht und die kinetische Energie ermittelt.

Das Bolzengewicht wurde mit einer Präzisionswaage (Präzisionswaage Sartorius ENTRIS II, WHI-Wägetechnik für Handel und Industrie GmbH & Co. KG, Hamburg DE) und der Durchmesser mit einer elektronischen Schiebelehre (Digital ABS AOS Messschieber, Mitutoyo Deutschland GmbH, Neuss DE) gemessen. Bolzengeschwindigkeit und Austrittslänge wurden mit Hilfe zweier unterschiedlicher Methoden ermittelt, deren Vergleichbarkeit im Anschluss geprüft wurde.

3.5.1 Methode 1 (Stun Tester-Methode und Steckschaum-Methode)

In diesem Fall wurde die Geschwindigkeit des austretenden Bolzens in Luft mit einem von zwei Geschwindigkeitstestgeräten der Firma Jarvis® gemessen (AST-106; AST 107-111 Stun Tester, <https://jarvisproducts.com/>). Dabei wurden die Schussgeräte senkrecht in

einen Zylinder eingespannt, in dem sich zwei Lichtschranken befanden, die im Abstand von 21,82 mm von der Bolzenmündung und nach weiteren 25,40 mm nach der ersten Schranke platziert sind. Nach Auslösen des Bolzengerätes detektieren die Lichtschranken den austretenden Bolzen und leiten das Signal an eine angeschlossene Messeinheit weiter, die daraus eine Geschwindigkeit berechnet. Das Geschwindigkeitstestgerät wurde für diese Untersuchung so umgebaut, dass alle untersuchten ladungsbetriebenen Geräte in die Fassung eingespannt und getestet werden konnten. Für die Messung der pneumatischen Geräte wurde sowohl das Original-Kopfstück als auch ein extra angepasstes Kopfstück verwendet. Mit jedem Schussgerät wurden mit der jeweils zu testenden Ladungsstärke 5 Schüsse getätigt und der Mittelwert aus den gemessenen Werten gebildet.

Um die Austrittslänge der Bolzenschussgeräte zu ermitteln, wurde mit jedem Gerät und der jeweils zu testenden Ladungsstärke 3-mal auf einen, in einer Schraubzwinde eingespannten Quader aus Blumensteckschaum (ELES VIDA® das Original Blumensteckschaum; Snowcommerce GmbH, Bremen, DE) geschossen (ca. 23,0 cm lang x 11,0 cm breit x 7,5 cm hoch). Hierfür wurde, wenn seitens des Herstellers vorhanden (Schermer® Typ KS, KR KL und Turbocut Blitz Kerner, Bullen Blitz), eine Abstandshülse über dem Blumensteckschaum verwendet (Abbildung 3 und 4). Nach Beendigung der Schussabgabe wurde der beschossene Blumensteckschaum mittig auf Ebene der Schusskanäle mit einem scharfen Messer geteilt und der Schusskanal mittels Schiebelehre vermessen. Am Ende des Schusskanals war stets ein rd. 1,0 cm breiter dunklerer Bereich komprimierten Steckschaums erkennbar. Aus allen Messungen wurde für jeden Typ von Bolzenschussgerät ein Mittelwert pro Ladungsstärke ermittelt. Die pneumatischen Schussgeräte wurden für die Messungen an einen Kompressor angeschlossen und jeweils mit 13,0 bar und 14,0 bar getestet.



Abbildung 3. Messung der Austrittslänge mittels Steckschaum-Methode. Links: Schermer® Typ KR mit Distanzstück auf Blumensteckschaum eingespannt in eine Schraubzwinde; rechts: Schusskanäle im Steckschaum nach Beschuss mit Cash® Typ Magnum Auto .22 unter Verwendung von roter und schwarzer Ladung.



Abbildung 4. Blumensteckschaum eingespannt zwischen 2 Brettern für den Beschuss mit dem Jarvis® Typ USSS-21 (Schussapparat ebenfalls eingespannt in eine Schraubzwinde).

3.5.2 Methode 2 (Hochgeschwindigkeitskamera)

Zusätzlich zu der oben genannten Methode wurden eine Reihe von Geräten einer zweiten Messung unterzogen, welche gemeinsam mit der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) Braunschweig durchgeführt wurde.

Für die Erhebung der Bolzengeschwindigkeit und der Austrittslänge wurde hier eine Hochgeschwindigkeitskamera (Fastcam mit 20,000 frames per second, Photron) verwendet. Das jeweilige Bolzenschussgerät wurde dafür in eine Halterung mit Meterstab eingespannt, welcher später als Referenz für die Ermittlung der Austrittslänge dient (siehe Abbildung 5). Die Hochgeschwindigkeitskamera wurde so eingestellt, dass lediglich der

Bereich der Bolzenmündung im Bildausschnitt zu erkennen war (siehe Abbildung 6). Die Kamera wurde zeitgleich mit dem Auslösen des Schusses gestartet und filmte den Vorgang des Bolzenaustritts.

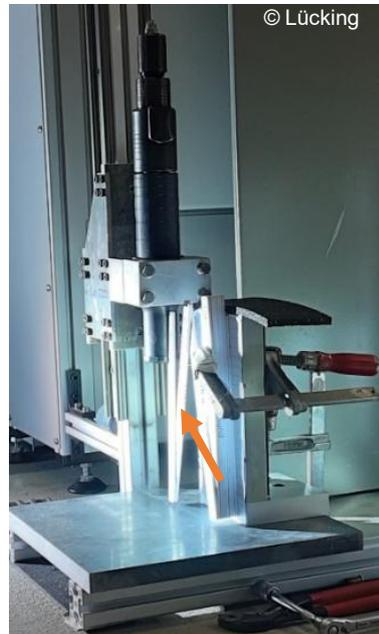


Abbildung 5. Messung der Austrittslänge und Geschwindigkeit des Bolzens mittels Hochgeschwindigkeitskamera. Schermer® Typ KS vor der Schussabgabe eingespannt in die Halterung mit angebrachtem Meterstab (oranger Pfeil) als Referenz für die Austrittslänge.



Abbildung 6. Hochgeschwindigkeitskamera ausgerichtet auf den Bereich vor der Bolzenmündung (Schussapparat nicht eingespannt) für die Messung der Bolzenaustrittslänge und -geschwindigkeit.

Die entstandenen Filmsequenzen wurden anschließend mithilfe der Software „Tracker“ (<https://physlets.org/tracker> (open source Physics)) analysiert. Dafür wurde auf den Videoausschnitt ein Koordinatensystem gelegt und ein Kalibrierungsmaßstab mithilfe des Meterstabs definiert. Das Video wurde nun Bild für Bild schrittweise abgespielt und dabei jede Veränderung des distalen Bolzenendes mit einem Trackingpunkt markiert (siehe Abbildung 7). Anhand der maximalen Auslenkung des Bolzens ließ sich so die Austrittslänge ermitteln. Mithilfe des Programms ließen sich auch die Geschwindigkeit und

die Beschleunigung des Bolzens berechnen und grafisch darstellen (siehe Abbildung 8). Jede Variation der Geräte wurde jeweils fünfmal gemessen. Aus allen Teilmessungen wurde ein Durchschnittswert gebildet. Die gemittelten Werte beider Messmethoden wurden anschließend mittels Excel dokumentiert und miteinander verglichen.

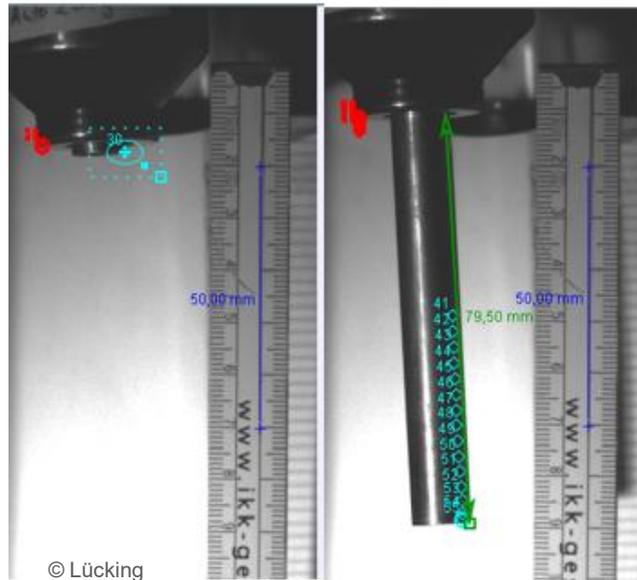


Abbildung 7. Filmausschnitt des aufgezeichneten Schussvorgangs mittels Hochgeschwindigkeitskamera; rechts im Bild jeweils der eingespannte Meterstab. Links: erstes Sichtbarwerden des distalen Bolzenendes mit Markierung eines „Tracker Punktes“; rechts: maximale Auslenkung des Bolzens von 79,5 mm.

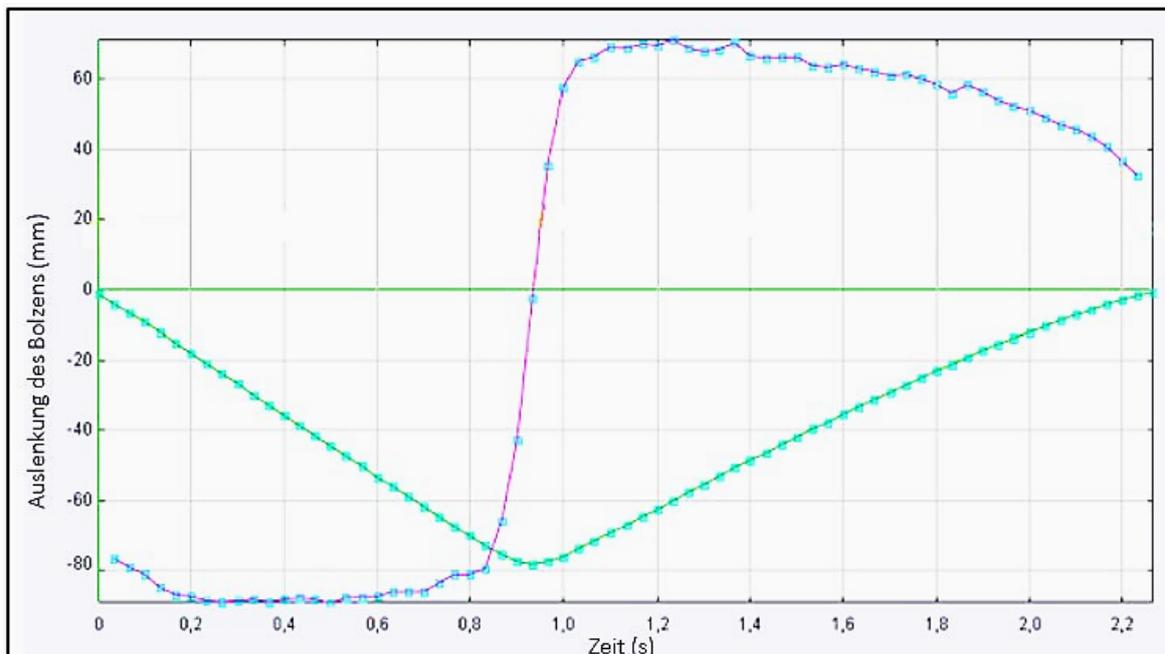


Abbildung 8. Darstellung des Bolzenaustritts mittels Tracker Programm; Y-Achse: Auslenkung des Bolzens in mm (türkise Kurve); X-Achse: Zeit in s; Pink/blau: Beschleunigung des Bolzens.

3.6 Statistik

Die Daten wurden in MS Excel (Microsoft Corporation, 2018, Microsoft Excel, WA, USA) dokumentiert, wobei Pivot-Tabellen für die Darstellung und Analyse verwendet wurden. Für statistische Analysen wurde die Software JMP v. 15 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) verwendet. Als abhängige Variable diente entweder der Summen Score über alle Prozessintervalle oder der Score eines bestimmten Prozessintervalls, welcher für jedes einzelne Tier berechnet wurde. Der Einfluss möglicher tier- und prozessbezogener Parameter (unabhängige Variablen) auf die Höhe des Scores bzw. Summen Scores wurde mittels Varianzanalyse (ANOVA-Modell) und Tukey-Kramer-Post-hoc-Test zum Vergleich der Mittelwerte untersucht. Ein Ergebnis wurde bei $p < 0,05$ als statistisch signifikant betrachtet. Die unabhängigen Variablen, die in das Modell einbezogen wurden, umfassten Parameter wie Gerätetyp und Funktionsweise des Betäubungsgerätes (pneumatisch oder mit Kartusche), Austrittslänge, Durchmesser, Geschwindigkeit und kinetische Energie des Bolzens. Zu den tierbezogenen Faktoren gehörten Tierkategorie (Kuh, Färsen, Bulle), Rasse, Schlachtkörpergewicht, Fettgehalt, Fleischigkeitsklasse und Behornung. Weitere Variablen im Modell waren prozesstechnische Faktoren wie Schlachtbetrieb, Saison, betäubende Person, Schussansatz, Betäubungseffektivität, Stechzeit und Abweichung von Position oder Winkel des Schusses. Die relativen Häufigkeiten der einzelnen Nominalparameter wurden mithilfe von Kontingenztafeln aufgeschlüsselt und mittels Chi-Quadrat-Tests auf Zufallsverteilung geprüft. Zudem wurden Entscheidungsbaum (schrittweise Partitionen) verwendet, um Kombinationen von voneinander abhängigen Variablen zu ermitteln, die einen bestimmten Summen Score am stärksten beeinflussen. Hierbei wurde die Stichprobe in Untergruppen aufgeteilt, sodass sich die Mittelwerte der Summen Scores der Untergruppen möglichst stark voneinander unterscheiden, bis keine sinnvolle Differenzierung mehr möglich war. Es wurden keine Effekte dargestellt, die lediglich auf eine sehr geringe Gruppengröße zurückzuführen sind (Schwelle: $n < 146 \triangleq 5,0\%$).

4 Publierte Studienergebnisse

Anika Lücking ^{1,2,*}, Helen Louton ² Martin von Wenzlawowicz ¹, Michael Erhard ³ and Karen von Holleben ¹

¹ bsi Schwarzenbek—Training and Consultancy Institute for Animal Welfare at Transport and Slaughter, Grabauer Str 27A, 21493 Schwarzenbek, Germany

² Animal Health and Animal Welfare, Faculty of Agricultural and Environmental Sciences, University of Rostock, Justus-von-Liebig-Weg 6b, 18059 Rostock, Germany

³ Animal Welfare, Animal Behavior, Animal Hygiene and Animal Husbandry, Department of Veterinary Sciences, Faculty of Veterinary Medicine, LMU Munich, 80539 Munich, Germany

* Correspondence: al@bsi-schwarzenbek.de

Movements after Captive Bolt Stunning in Cattle and Possible Animal- and Process-Related Impact Factors—A Field Study

Animals **2024**, *14*(7), 1112,

angenommen am 02. April 2024

<https://doi.org/10.3390/ani14071112>

Article

Movements after Captive Bolt Stunning in Cattle and Possible Animal- and Process-Related Impact Factors—A Field Study

Anika Lücking ^{1,2,*} , Helen Louton ² , Martin von Wenzlawowicz ¹ , Michael Erhard ³ 
and Karen von Holleben ¹ 

¹ bsi Schwarzenbek—Training and Consultancy Institute for Animal Welfare at Transport and Slaughter, Grabauer Str 27A, 21493 Schwarzenbek, Germany; mvw@bsi-schwarzenbek.de (M.v.W.); info@bsi-schwarzenbek.de (K.v.H.)

² Animal Health and Animal Welfare, Faculty of Agricultural and Environmental Sciences, University of Rostock, Justus-von-Liebig-Weg 6b, 18059 Rostock, Germany; helen.louton@uni-rostock.de

³ Animal Welfare, Animal Behavior, Animal Hygiene and Animal Husbandry, Department of Veterinary Sciences, Faculty of Veterinary Medicine, LMU Munich, 80539 Munich, Germany; m.erhard@tierhyg.vetmed.uni-muenchen.de

* Correspondence: al@bsi-schwarzenbek.de

Simple Summary: Regarding animal welfare during cattle slaughter, two issues emerge: firstly, consumers are becoming steadily alienated from meat production, and secondly, some media-released slaughterhouse footage is causing dissatisfaction among a public increasingly focused on animal welfare. Such footage often reveals cattle kicking during shackling and exsanguination, described by commentators as indicative of insufficient stunning effectiveness. Consequently, this undermines confidence in both the meat industry and the competence of supervising authorities. At slaughter, cattle movements after stunning affect occupational safety and often lead to a prolonged interval until bleeding occurs. The objective of this study was to comprehensively describe and analyse these movements in cattle (*Bos taurus*) in relation to stunning effectiveness, as well as to identify influencing factors. The results show that movements occurred in most cattle after captive bolt stunning. However, none of the movements observed were related to stunning effectiveness. Breed type and sex category, as well as the type and design of the captive bolt stunner used, influenced the movements of cattle after stunning. The results of this investigation underscore the importance of applying reliable indicators to assess stunning effectiveness.

Abstract: Movements in cattle after captive bolt stunning cause problems in the slaughter process and lead to uncertainties in assessing stunning effectiveness. The objective of this study was to categorize and quantify these movements and determine animal- and process-related impact factors, as well as connections to stunning effectiveness and shooting position. In total 2911 cows, heifers, and bulls (dairy, beef, and crossbreeds) were examined (mean age 3.02 years). Movements from landing until at least four minutes after sticking were recorded by action cams (Apeman® A100). Nine movement categories were defined (“kicking hind limb”, “twitching”, “bending and stretching hind limb”, “lifting and bending forelimb”, “body arching laterally”, “body arching ventrally”, and “arching backwards”). According to the movement severity, a score was assigned to each category. The scores were summed, either for certain process intervals, e.g., LANDING (ejection from the stunning box), HOISTING, or STICKING, or for the total time between LANDING and end of the FOURTH MINUTE OF BLEEDING (sum score). Statistical analysis (ANOVA) was performed on the scores. Only 6.6% of cattle showed no movement. Most movements occurred during STICKING and FIRST MINUTE OF BLEEDING, occurring rarely up to 8 min after sticking. While cows moved most at LANDING, bulls and heifers moved more if all process intervals were considered. The sum score was highest in German Angus, Charolais, and Limousin and lowest in Brown Swiss and Simmental. The score at LANDING was highest in German Angus and Black Holstein. The use of pneumatic stunners and an increase in bolt-exit length significantly reduced movements. No impact of stunning effectiveness on movements was found, but only 19 cattle showed reduced effectiveness.



Citation: Lücking, A.; Louton, H.; von Wenzlawowicz, M.; Erhard, M.; von Holleben, K. Movements after Captive Bolt Stunning in Cattle and Possible Animal- and Process-Related Impact Factors—A Field Study. *Animals* **2024**, *14*, 1112. <https://doi.org/10.3390/ani14071112>

Academic Editors: Temple Grandin and Elbert Lambooj

Received: 26 January 2024

Revised: 19 March 2024

Accepted: 2 April 2024

Published: 4 April 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Keywords: animal welfare; captive bolt; cattle; movements; slaughter; stunning effectiveness; unconsciousness

1. Introduction

In the European Union (EU), most cattle are slaughtered after captive bolt stunning using pneumatic or cartridge-driven devices [1]. After stunning, the collapsed cattle are released from the restraining box onto a landing grid, where one hind leg is shackled, and the cattle are hoisted for sticking (exsanguination). In Germany, bleeding is usually performed via chest stick after a skin incision and changing of the knife.

According to Regulation (EC) No. 1099/2009 [2] on the protection of animals at the time of killing, restraining equipment and facilities should be designed and used to optimise the application of the stunning method, prevent injury or contusions to the animals, and minimize struggling. If cattle are stunned using pneumatic captive bolt devices, restraining boxes must restrict both the lateral and vertical movement of the animal's head during stunning. The regulation requires effective stunning and comprehensive monitoring of stunning effectiveness to prevent the animal from being conscious during slaughter and subsequent exsanguination, experiencing pain, fear, and anxiety before finally dying due to blood loss. To ensure good stunning effectiveness, restraining, stunning, and bleeding must be carried out by persons holding a certificate of competence [2]. Each stunning method should adhere to defined key parameters, and the equipment utilized must be well maintained to ensure the effective stunning of all animals [3]. For penetrative captive bolt stunning, these key parameters include the position and direction of the shot, appropriate velocity, exit length and diameter of the bolt according to the animal's size and species, and the maximum stun-to-stick/kill interval. In Germany, the Animal Welfare at Slaughter Ordinance specifies a maximum interval between stunning and sticking of 60 s for cattle [4], both to meet the time limit for bleeding and to reduce the reflex kicking movements. Pithing and, thus, mechanical destruction of the brain and spinal cord prevented the animal from regaining consciousness during exsanguination. By reducing post-stun movements at the same time, pithing also led to a lower risk of injury for staff at hoisting and sticking. Due to the increasing incidence of bovine spongiform encephalopathy (BSE) in Europe in the mid-1990s, from 1 January 2001 onwards the European Commission banned the use of pithing rods in cattle (*Bos taurus*), sheep (*Ovis gmelina aries*), and goats (*Capra aegagrus hircus*) slaughtered for human consumption [5]. Following this ban, convulsions and reflex-like body movements significantly increased in cattle after captive bolt stunning [6]. Furthermore, more animals regained consciousness during bleeding [7–11]. This was mostly a result of deficiencies regarding the shot placement, the stunning equipment used, and/or the strength of the cartridge used [6]. Both the increased occurrence of movements and signs of regaining consciousness during bleeding were likely to be due to the lack of pithing. However, due to the increasing use of modern stun boxes with tight head restraints and the development of more powerful captive bolt devices (especially pneumatically powered devices), stunning effectiveness at European cattle abattoirs has improved significantly in recent years [1,12]. This also applies to other bovines [13].

Previous studies indicate that following the ban on pithing, more than half of all captive bolt-stunned cattle show movements during hoisting, sticking, and bleeding [14,15]. However, movements do not always occur in a consistent pattern. Martin et al. [16] already found that Holstein cattle showed more kicking movements than other breeds, especially when stunned using a device with a relatively longer exit length of the bolt. In studies by Terlouw et al. [17], all cattle showed at least one movement after stunning, and post-stun movements by cattle with the spinal cord severed after stunning did not differ from those by cattle on which this manipulation was not performed. Clonic seizures such as reflex-like paddling of the hind limb are signs of a correctly performed bolt stun in cattle [17,18]. This

is caused by the lack of inhibition of medullary or spinal reflexes due to the trauma-induced failure of higher-level centres in the brain [19] and also explains the occurrence of the above-mentioned convulsions during a zero-line EEG [20,21].

Nevertheless, there are currently two problems in practice since pithing has been banned. While the sometimes-strong excitatory movements often impede quick and safe shackling and sticking [22], leading to an extended stun-to-stick interval, there is also inherent uncertainty in the assessment of stunning effectiveness regarding movements. This uncertainty is heightened by the growing prevalence of video surveillance in abattoirs, coupled with public reactions to unauthorized video footage entering a society that is increasingly concerned about animal welfare. Consequently, the attention of animal welfare activists and some veterinarians is repeatedly drawn to the sometimes very impressive movements, which are then interpreted as a sign of regained consciousness. In the literature, there are only a few detailed descriptions of these post-stun movements and the possible impact factors, further contributing to existing uncertainty.

The aim of this publication is to record (1) the occurrence of movements after captive bolt stunning in cattle and to describe them in detail and to identify (2) animal-related and (3) process-related impact factors, as well as (4) a possible connection to reduced stunning effectiveness. The process-related factors included in the analysis also cover the various key parameters of the bolt gun. We hypothesised that movements would regularly occur in well-stunned cattle and that cows, especially the Black Holstein breed, would show the most movements. Furthermore, we hypothesised an association between the velocity of the bolt and the amount of movement. This work aims to contribute to the correct assessment of stunning effectiveness in cattle following captive bolt stunning.

2. Materials and Methods

2.1. Experimental Procedure

The investigation took place between June 2020 and April 2021 at five different German abattoirs (A–E), on two to four days each during routine slaughter. On each examination day, approximately 200 cattle were continuously observed by two pre-trained veterinarian investigators and filmed with the help of three to four action cameras, starting at stunning and lasting for at least four minutes after sticking. One camera was mounted above the restraining device, focussed on the animal's head and body, to evaluate the effectiveness of the shot and detect second shots. The other cameras were positioned to continuously observe the head and body of the animals from landing (ejection from the stunning box) until at least four minutes after sticking. For each animal, animal-related and process-related factors were collected. The animal-related factors were sex category (bulls, heifers, and cows), breed, and carcass weight, as well as fat and conformation class, using the European Union's EUROP grid method of beef carcass classification. The traditional grid is commonly used by most beef plants. Conformation is assessed on an E to P basis (EUROP), with E being a convex and shapely carcass, R being an average shape or straight profile, and P being a plainer carcass with a concave profile. Fat is assessed on a 1 to 5 basis, with 1 being very lean and 5 being very fat. Regarding stunning equipment, the device model of the stunner, function type (cartridge or pneumatic), cartridge strength (resp., air pressure) used, exit length of the bolt, bolt diameter, bolt velocity and weight, and the resulting kinetic energy were monitored. In addition, the stunner operator, the stun-to-stick interval, and the start of further dressing procedures (duration of bleeding) were recorded.

2.2. Slaughter Facilities

The participating abattoirs were medium to large-sized slaughter facilities with a daily slaughter capacity of 300 to 1000 animals (Table 1).

Table 1. Features for restraining, stunning, and bleeding at the participating abattoirs.

Abattoir	Approximate Slaughter Capacity per Day (no. of Cattle)	Slaughter Speed per Hour (no. of Cattle/h)	Number of Staff Performing the Stunning	Stunning Device	Head Restraint/ Manufacturer	Mean Stun-to-Stick Interval (s)	Bleeding Time before further Processing (min)
A	400	50	2	EFA® VB 315 (Schmid & Wezel GmbH, Maulbronn, Germany); Schermer® KR, KS (Freund Maschinenfabrik GmbH & Co. KG, Paderborn, Germany)	Tight restraint ¹ , Allkon® (Allkon GmbH & Co. KG, Steinau an der Straße, Germany)	37.8	3.0
B	700	65	3	Jarvis® USSS-21 (Jarvis GmbH, Buchholz, Germany)	Tight restraint ¹ , MPS® (Marel, Lichtenvoorde, Netherlands)	47.5	7.0
C	1000	60–70	3	EFA® VB 315 (Schmid & Wezel GmbH, Maulbronn, Germany);	Tight restraint ¹ , BANSS® (JWE-BANSS GmbH; Biedenkopf, Germany)	49.6	6.0
D	500	55	4	EFA® VB 315 (Schmid & Wezel GmbH, Maulbronn, Germany);	Tight restraint ¹ , DGS® (DGS Processing Solution, Haaksbergen, Netherlands)	42.0	6.0
E	350	50–55	2	Schermer® KL, KS (Freund Maschinenfabrik GmbH & Co. KG, Paderborn, Germany)	Loose (passive), self-built	51.0	4.5

¹ Tight restraint: lateral and vertical restriction of movement of the head [2].

At all facilities, cattle were delivered on the day of slaughter and temporarily (20 min to 7 h) kept in lairage. Except for abattoir E, all facilities used a modern stun box with tight head restraint (active) for restraining before stunning (Figure 1). The staff performing the stunning were trained (certificate of competence) and were aware of the optimum shooting position, which is 1.0 cm above the intersection of two imaginary lines between the centre of the eye and the opposite centre of the horn base, with deviations of less than 2 cm, and a shooting direction perpendicular to the skull [1].



Figure 1. Different types of stun boxes to restrain cattle for captive bolt stunning; tight (active) head restraint DGS® (left) and Banss® (middle), and self-built loose (passive) head restraint (right).

2.3. Animals

A total of 2911 cattle, consisting of dairy, beef, and crossbreeds, were examined. Twenty animals were excluded from this study due to missing information, particularly due to incomplete video recordings. Further analyses thus included 2891 cattle. Of these, 31.4% were cows, 51.3% bulls, and 17.2% heifers. The distribution included 48.5% dairy cattle, 10.9% beef cattle, and 40.6% dual-purpose breeds. The most common breeds were Black Holstein (40.6%), Simmental (18.6%), and crossbreeds (14.7%). Most of the cows (79.0%) were Black Holstein. Among the bulls and heifers, the breeds Simmental (32.9%/8.0%), crossbreed (19.3%/24.3%), and Black Holstein (17.7%/39.0%) were predominant. The

information on the breed, sex category, age, and carcass weight of the selected animals was gained from the cattle passports and slaughter lists.

2.4. Key Parameters and Features of Captive Bolt Devices

Different penetrating captive bolt devices, both pneumatic and cartridge-driven, and powered by different cartridge strength or air pressures, were used. For specifications, see Table 2.

Table 2. Specifications of captive bolt stunners used, including key parameters according to Reg. (EC) No. 1099/2009 [2].

Abattoir	Manufacturer, Type of Stunning Device	Function Type of Stunning Device	Pressure ¹ or Cartridge Strength Used	Velocity in Air in (m/s) ⁴	Extension Lengths in (mm) ⁴	Diameter in (mm) ⁴	Kinetic Energy in (Joule)	Position of the Person in Charge of Stunning
A	EFA [®] VB 315 (Schmid & Wezel GmbH, Maulbronn, Germany)	Pneumatic	13.5 bar	40.1	119.0	14.5	453	Left of the animal
A	Schermer [®] KR (Freund Maschinenfabrik GmbH & Co. KG, Paderborn, Germany)	Cartridge	Red ²	58.3	88.0	12.0	389	Left of the animal
A	Schermer [®] KS (Freund Maschinenfabrik GmbH & Co. KG, Paderborn, Germany)	Cartridge	Red ²	52.6	81.0	12.0	334	Left of the animal
B	Jarvis [®] USSS-21 (Jarvis GmbH, Buchholz, Germany)	Pneumatic	15.5 bar	43.5	88.0	12.0	488	Right of the animal
B	Jarvis [®] USSS-21 (Jarvis GmbH, Buchholz, Germany)	Pneumatic	15.5 bar	37.6	90.0	14.5	421	Right of the animal
C	EFA [®] VB 315 (Schmid & Wezel GmbH, Maulbronn, Germany)	Pneumatic	14.2 bar	41.6	119.0	14.5	488	Left of the animal
D	EFA [®] VB 315 (Schmid & Wezel GmbH, Maulbronn, Germany)	Pneumatic	14.2 bar	41.6	119.0	14.5	488	Front of the animal
E	Schermer [®] KL (Freund Maschinenfabrik GmbH & Co. KG, Paderborn, Germany)	Cartridge	Red ²	58.4	121.0	12.0	433	Right of the animal
E	Schermer [®] KS (Freund Maschinenfabrik GmbH & Co. KG, Paderborn, Germany)	Cartridge	Blue ³	50.3	79.0	12.0	306	Right of the animal

¹ Air pressure as shown by the manometer; ² red cartridge strength corresponds to 4.9 grain or 320 mg; ³ blue cartridge strength corresponds to 4.8 grain or 315 mg; and ⁴ key parameters according to Reg. (EC) No. 1099/2009.

All the devices used were examined beforehand. The diameter of each bolt was determined using a digital calliper (Digital ABS AOS calliper, Mitutoyo Germany GmbH, Neuss, Germany), and the weight of the bolt was determined using a precision balance (Sartorius ENTRIS II precision balance, WHI-Wägetechnik für Handel und Industrie GmbH & Co. KG, Hamburg, Germany). In order to obtain comparable values for exit velocity and kinetic energy, all stunning devices included were checked using a velocity tester (AST-106; AST 107-111 Stun Tester, Jarvis Products Corporation, Middletown, CT, USA, <https://jarvisproducts.com/> accessed on 1 November 2023). The kinetic energy was then calculated from the velocity and bolt weight.

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \times m \times v^2$$

To determine the exit length, the stunning device used was shot at floral foam (ELES VIDA[®], Bremen, Germany), and then the penetration depth was measured using a calliper. Measurements of the velocity and exit length were performed for all combinations of cartridge strengths or pneumatic pressure applied. To validate the method of exit length and velocity determination, a portion of the devices was rechecked in collaboration with a federal physics institute (PTB, Braunschweig, Germany). For this purpose, the shooting process was recorded using a high-speed camera (Fastcam 20,000 fps (frames per second), Photron, Reutlingen, Germany) and the recordings were then analysed using specific software ("Tracker"; <https://physlets.org/tracker>; open-source Physics, version number 5.1.5, accessed on 1 May 2020). The values determined by both measuring methods match well, although we could only perform the tests on 3–4 shots using a combination of cartridge and pressure.

2.5. Measurements

After the cattle had been stunned, an employee of the abattoir checked the state of consciousness in the stun box (collapse, relaxed eyelids, and ears) and at the landing grid (wide pupil, fixed eye, and no breathing; see Table 3) before they were shackled and hoisted. Bleeding was carried out via a chest stick after a previous skin incision (two-knife technique). Except at abattoir B, the chest stick procedure was performed using a single-edged slaughter knife. Abattoir B used a double-edged knife with a hollow handle and a peristaltic pump for blood collection. Individual animals were bled in a recumbent position if hoisting was delayed due to strong tonic and clonic seizures. The time to further dressing was between three and seven minutes. Of the two veterinarian investigators one had 30 years of experience and the other had trained for 10 months in advance to determine stunning effectiveness, respectively. An animal was considered properly stunned when it collapses immediately after stunning, exhibits tonic and clonic seizures, floppy ears, and no attempts to regain posture, both on the landing grid and during hoisting, sticking, and exsanguination. Additionally, apnoea starts immediately after the shot, corneal reflex on the landing grid is negative and throughout the entire observation period the eyes remain fixed with dilated pupils and no respiratory movements are noticed [23]. We distinguished between signs of sufficient stunning, doubtful stunning, and insufficient stunning (Table 3). Sufficiently stunned animals do not exhibit any signs of preserved brainstem activity, such as eye or eyelid movements and respiratory movements. The category insufficient stunning includes a high risk of regaining consciousness as well as remaining or regained consciousness [9].

Table 3. The evaluation scheme for stunning effectiveness is mainly based on EFSA AHAW Panel [23], von Holleben et al. [24], and von Wenzlawowicz et al. [9].

Body Part	Doubtful Effect of Stunning ¹		Insufficient Stunning Effect ²	
	Parameter	Definition	Parameter	Definition
Whole body	Abnormal cramps	The animal does not show a typical tonic or tonic-clonic convulsive phase after the shot [10]	No collapse after shot, posture	Failure to collapse, attempts to regain posture after being shot Arching of the back and sustained backward lifting of the head, while the animal hangs on the rail [25]; the symptom can also be shown while an animal is lying in a horizontal position [26] Ears do not hang down limply but are tense or straightened (visual and palpatory examination in case of suspicion)
			Arched back righting reflex	
Ears		The eyeball is not centred within 25 s after the shot;	Ear tone	
Eyes	Eyeball rotation	the eyeballs may be rotated to a great extent so that the pupils may not be visible [10]; the eyeball is rotated [27]	Corneal reflex	Repeated blinking response elicited by touching or tapping the cornea
	No pupil dilatation	The pupil is not fully dilated	Spontaneous blinking	Spontaneous closing of the eyelids without prior irritation of the eyelid or cornea
	Nystagmus	Spontaneous rapid side-to-side movements of the eyeball	Focused eye movements	Accommodation of the eye, the eyeball follows movements in the vicinity
	Corneal reflex	Single blinking response elicited by touching or tapping the cornea		
Respiratory system	Breathing movements (<4 times)	The animal shows up to 3 breathing movements after the shot, which can be recognised by movements of the flank, muzzle, or nostrils	Breathing movements (≥4 times)	The animal shows more than 3 breathing movements after the shot, which can be recognised by movements of the flank, mouth, or nostrils
			Vocalisation	Vocalisation in the form of moaning, grunting, or mooing

¹ Transition zone between definitely unconscious/brain dead and definitely conscious but low risk of awakening; no pain and suffering but first indicators for a shallow depth of stunning [25]; ² high risk of regaining consciousness (still in transition zone) as well as remaining or regained consciousness. Signs of a conscious state are no loss of posture, righting reflex, spontaneous blinking, and focused eye movements.

The first investigator stood next to the head of the animal at the landing grid and recorded the ear tag number, stunning efficiency during LANDING and HOISTING, and stun-to-stick interval (stopwatch; Delta E 100, Hanhart 1882 GmbH, Gütenbach, Germany). The second investigator checked stunning efficiency during bleeding and subsequently measured the angle and position of the shot hole using a geo-triangle (Westcott E-10132 00

Geodreieck, Acme United Europe GmbH, Solingen, Germany), a plastic stick (diameter 8.4 mm or 12.4 mm, depending on the bolt diameter; POM round bar, Nattmann GmbH, Willich, Germany; Figure 2), and a multi-angle ruler (Wohao, Shenzhen, China; Figure 2). Deviations of at least 2 cm from the ideal shooting position [1] and at least 10° from the perpendicular were recorded.



Figure 2. Recording possible deviations of shot position and angle using a plastic stick inserted in the shot hole and a geo-triangle at the end of the bleeding line.

On each examination day, three to four action cameras (Apeman A100S, Apeman, Shenzhen, China, <https://de.apemans.com/collections/action-kamera>, accessed on 1 November 2023) were installed, depending on the facility, to record each animal from the stun box until at least the end of the fourth minute after sticking. The observation period was divided into eight process intervals. The first interval, LANDING (1), started when the animal fell out of the stun box and touched the landing grid (approx. 7 s–20 s after the shot) and ended as soon as the shackle chain tightened during lifting (approx. 15 s–55 s after shot). The next process interval, HOISTING (2), was followed by SKIN INCISION (3). The latter started with the first contact between knife and skin (approx. 24 s–60 s after the shot) and ended before STICKING via the chest stick (4). This interval started when the knife was inserted into the chest entrance (26 s–78 s after the shot) and ended 3 s after the knife had been pulled out. STICKING was followed by the FIRST (5), SECOND (6), THIRD (7), and FOURTH MINUTE OF BLEEDING (8). These last four process intervals each lasted for one minute, the first starting four seconds after STICKING and the last ending 240 s later at the earliest (maximum 400 s). The subsequent analysis of the video material regarding movement category, frequency, and time of movement was always carried out by the same pre-trained investigator. For each animal, the movement categories were recorded based on process interval. Each movement category was counted only once per process interval. A score value was assigned to each movement category (0–3), reflecting the severity of the movement in terms of vigour, speed, frequency, and impact on the process. A score per animal and process interval was obtained by addition. The scores of all process intervals summed up resulted in the total score (sum score) for an individual animal. The definitions of movement categories and scores are shown in Table 4. Examples showing the different movement categories can be found as movies in the Supplementary Materials.

Table 4. Definitions of post-stun movement categories and scores (for examples, see also the Supplementary Materials).

Movement Category	Definition	Intensity ¹	Severity of Movement, Score Explanation	Score Value
Kicking hind limb	A single/free hind limb is moved away from the body and back repeatedly and rapidly.	Moderate ²	Fast Vigorous Dangerous to workers	2.0
		Intense ³	Very fast Vigorous Dangerous to workers	3.0
Twitching	More than one limb is moving, possibly together with the trunk and neck. The movement can be synchronous or asynchronous and may involve the hind limb and forelimb (e.g., forelimb paddling together with hind limb kicking).	Moderate ²	Fast Vigorous Dangerous to workers	2.0
		Intense ³	Very fast Vigorous Dangerous to workers	3.0
Bending forelimb	One or both forelimbs are bent towards the body. The movement can be synchronous or asynchronous, single or repeated (e.g., forelimb paddling with bent limbs).		Either fast or slow Predominantly vigorous May impede the work	1.0
Lifting forelimb	One or both forelimbs lift in an extended position. The movement can be synchronous or asynchronous, single or repeated (e.g., forelimb paddling with stretched limbs).		Either fast or slow Predominantly vigorous May impede the work	1.0
Body arching laterally	The longitudinal axis of the hoisted animal is bending to one side and the head and body are not hanging straight down; in most cases without repetition.		Either fast or slow Predominantly vigorous May impede the work	1.0
Body arching ventrally	The head and possibly the trunk of the hoisted animal are bending ventrally; in most cases without repetition.		Either fast or slow Predominantly vigorous May impede the work	1.0
Stretching hind limb	The free hind limb extends away from the body for at least 3 s.		Slow No repetition within 5 s No impact on work	0.5
Bending hind limb	The free hind leg is bent and pulled towards the body.		Slow No repetition within 5 s No impact on work	0.5
Arching backwards/righting reflex	Arching of the back and sustained backward lifting of the head, while the animal hangs on the rail [25].		Slow No repetition within 5 s No impact on work	0.5
No movement	Animal shows none of the movements listed above.			0

¹ A graduation of intensities is only used for kicking and twitching during LANDING and HOISTING: from the process interval SKIN INCISION onwards, no differentiation was made between moderate and intense; ² Moderate: 1. frequency <1/s and duration <5 s; 2. frequency >1/s and duration <5 s; and 3. frequency <1/s and duration >5 s; ³ Intense: frequency >1/s and duration >5 s; example for the calculation of the sum score: An animal shows “kicking hind limb intense” (3.0) at LANDING, “body arching ventrally” (1.0) at STICKING, “kicking hind limb” (2.0) and “bending forelimb” (1.0) in the FIRST MINUTE OF BLEEDING and “stretching hind limb” (0.5) in the FOURTH MINUTE OF BLEEDING. The scores for the individual process intervals would then look as follows: LANDING 3.0, HOISTING 0, SKIN INCISION 0, STICKING 1.0, FIRST MINUTE OF BLEEDING 3.0 (2.0 + 1.0), SECOND MINUTE OF BLEEDING 0, THIRD MINUTE OF BLEEDING 0, and FOURTH MINUTE OF BLEEDING 0.5. This results in a total sum score of 3.0 + 0 + 0 + 1.0 + 3.0 + 0 + 0 + 0.5 = 7.5.

2.6. Statistical Analysis

Data were documented in MS Excel (Microsoft Corporation, (2018), Microsoft Excel, Redmond, WA, USA) and pivot tables were used for plotting and analysis. The software JMP v. 15 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) was used for statistical analyses. The dependent variable was the sum score across all process intervals or the score of a specific process interval, calculated for each individual animal. The influence of possible animal- and process-related factors (independent variables) on the scores was investigated via analysis of variance (ANOVA model) and the Tukey–Kramer post hoc test to compare means. A result was considered statistically significant for $p < 0.05$. Independent variables included in the model were captive bolt parameters, model and function type of stunning device (pneumatic or cartridge powered), exit length, diameter, velocity, and kinetic energy of the bolt. Animal-related factors included were sex category (cow, heifer, and bull), breed, carcass weight, fat, and conformation class. Other variables in the model were stunning effectiveness, as well as the process-related variables stun-to-stick interval and deviation in position or angle of the shot. The relative frequencies of individual nominal parameters were described using contingency tables and tested for random distribution using Chi-square tests. In addition, decision trees (stepwise partitions) were used to determine combinations (of independent variables) that most strongly influence a certain expression of the sum score. In this process, the sample is split into subgroups in such a way that the means of the sum score of subgroups differ as much as possible until no further sensible

differentiation can be made. Only effects leading to significant deviations from the mean are presented, and results are not shown when concerning an insignificantly small group (threshold: $n < 146 \hat{=} 5\%$).

3. Results

3.1. Occurrence of Movements

Most cattle showed movements after captive bolt stunning (number of movements across all process intervals: minimum: 0; maximum: 15; mean: 3.5). Only 6.6% of the animals did not show any movement at any process interval (bulls 6.1%, heifers 4.0%, cows 8.7%). Most movements were recorded in the process interval FIRST MINUTE OF BLEEDING. Here, 61.7% of the animals showed at least one movement. In addition, at STICKING, more than half of the cattle (58.0%) showed at least one movement. In the SECOND (14.2%) and THIRD MINUTES (6.4%) OF BLEEDING, considerably fewer movements were observed in cattle compared with the FIRST MINUTE OF BLEEDING. In the FOURTH MINUTE OF BLEEDING, the proportion of animals moving increased slightly (12.2%). Late movements during bleeding also occurred in cattle that had previously been hanging on the rail completely motionless and with limp tails. In some cattle, movements could still be observed more than 8 min after STICKING. During one process interval, several movements of different categories could occur. In some animals, up to five different movement categories were observed within the same process interval.

The mean sum score, a measure of the frequency and intensity of an animal's movements across all process intervals, was 4.87 (minimum: 0; maximum: 20.5; median: 4.5). The interquartile range of the sum score was 2.5 to 7.0. The distribution of the sum score is shown in Figure 3. The mean score at LANDING was 0.79 (minimum: 0; maximum: 6.0; median: 0).

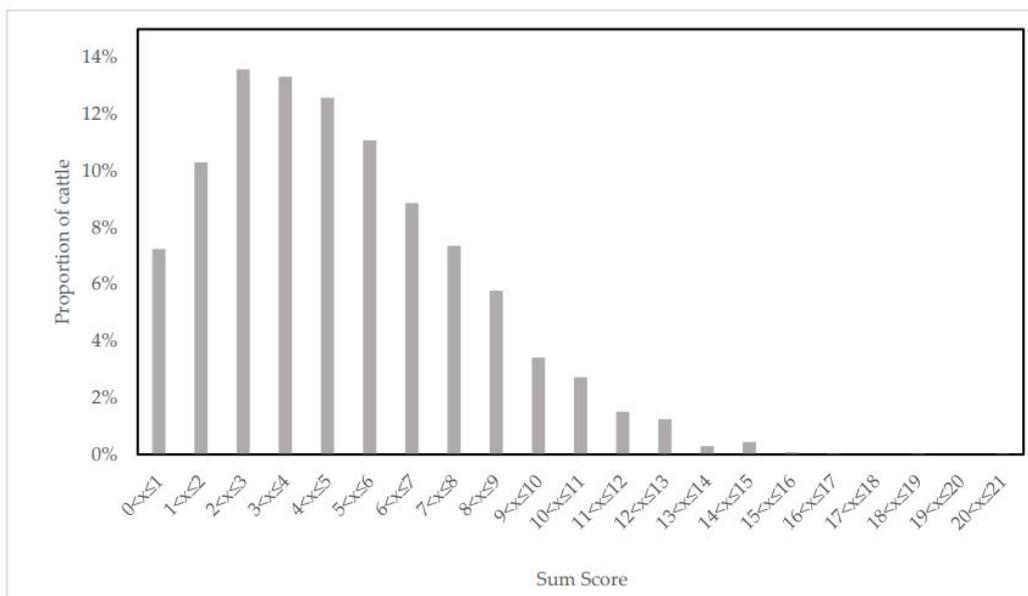


Figure 3. Distribution of sum score values (a measure of frequency and intensity of an animal's movements across all process intervals; mean: 4.87; minimum: 0; maximum: 20.5; and median: 4.5) in the study group (N = 2891) (relative frequency).

All movements occurred spontaneously as well as in connection with manipulation (grasping and lifting limbs, pulling of the shackle on the hind limb, sticking, and further dressing of the lower feet). Particularly strong and intense movements were observed at LANDING and during HOISTING. Movements were obvious during LANDING in 31.7%

of the cattle and during HOISTING in 43.7%. The most common movements during these early process intervals were “kicking hind limb moderate” (21.9%), “twitching moderate” (18.0%), and “twitching intense” (13.6%). In particular, “kicking hind limb intense” and “twitching intense” on the landing grid made it very difficult for the staff to start up shackling, which often led to an extended stun-to-stick interval. Occasionally, the “kicking hind limb” and “twitching” movements caused shackles to be thrown out of position. This was especially observed in Holstein dairy cows.

During the process intervals SKIN INCISION and STICKING, “kicking hind limb” (39.0%), “body arching ventrally” (25.5%), “lifting forelimb” (22.9%) and “bending forelimb” (22.4%) were observed most frequently. The majority of late movements towards the end of exsanguination were “stretching hind limb” (7.2%), “kicking hind limb” (3.7%), and “bending forelimb” (1.1%). In the late phases of bleeding, it was frequently noticed that the tail tension temporarily increased again. In some cases, there was also intensive tail flapping, even though the tail had already been hanging limply for minutes before. None of the animals that moved for more than four minutes after sticking showed signs of regaining consciousness.

Category of Movements during Different Process Intervals

The absolute number of individual movements related to the eight different process intervals is shown in Figure 4. The movement most frequently counted was “kicking hind limb”, including “kicking hind limb moderate” (n = 2810). Kicking occurred in each process interval but most frequently between LANDING and the end of the FIRST MINUTE OF BLEEDING. In some cases, “kicking hind limb” was observed over 50 times, lasting several process intervals. During LANDING and HOISTING, 21.9% of the animals expressed “kicking hind limb moderate” and 10.0% expressed “kicking hind limb intense”. During HOISTING, “kicking hind limb”, either moderate or intense, was observed in 20.3% of the cattle (18.8% bulls, 27.7% heifers, 18.7% cows). “Kicking hind limb” during STICKING occurred in 41.6% of the animals (32.0% bulls, 30.0% heifers, 63.0% cows). The next frequent movements were “lifting forelimb” (n = 1761) and “bending forelimb” (n = 1655), which occurred in all process intervals from HOISTING onwards but most frequently during SKIN INCISION, STICKING, and the FIRST MINUTE OF BLEEDING. We observed that “bending forelimb” tended to occur later than “lifting forelimb”. “Twitching”, either moderate or intense, occurred almost exclusively during LANDING or HOISTING. “Stretching hind limb” was observed in each process interval, but most frequently in the FIRST MINUTE OF BLEEDING. The slight increase in movements at the FOURTH MINUTE OF BLEEDING was predominantly due to “stretching hind limb”, often together with shivering of the same. The category “body arching ventrally” almost always occurred during SKIN INCISION or STICKING, and in individual cases, also during HOISTING or still in the FIRST MINUTE OF BLEEDING (see Figure 4). In the later course of bleeding (SECOND MINUTE OF BLEEDING and later), “body arching ventrally” was observed only four times. In particular, provoked by sticking, cattle moved their heads and necks vigorously in the ventral direction. Across all process intervals, “body arching ventrally” was observed in 649 cattle (22.4%), regularly accompanied by “kicking hind limb” or “lifting forelimb”. “Body arching laterally” was detected in 291 animals overall (10.0%), mainly during HOISTING, SKIN INCISION, and STICKING. Only six times was this category of movement observed at a later process interval, i.e., four times during the SECOND MINUTE and twice during the THIRD MINUTE OF BLEEDING. The movement of “body arching laterally” as such could either be short or held for more than a minute. In this study, no “arching backwards” was noticed in any animal.

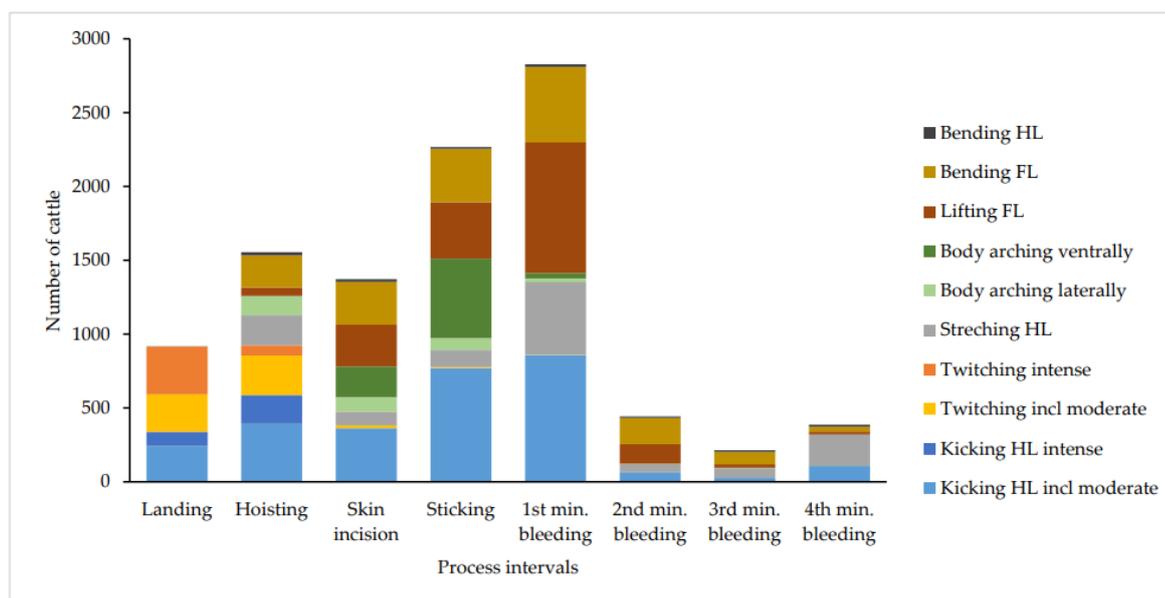


Figure 4. The absolute number of observed movement categories related to the eight different process intervals (more than one movement by animal and process interval possible); HL = hind limb; FL = forelimb.

3.2. The Effect of Animal-Related Factors on Movements

3.2.1. The Effect of Sex Category

Sex categories differed in terms of frequency of movement during the different process intervals. A total of 48.9% of cows, 37.2% of heifers, and 19.1% of bulls showed movements at LANDING. During HOISTING, the percentage of heifers and bulls with movements increased (52.4% and 39.7%, respectively), while the percentage of cows decreased (45.4%). During SKIN INCISION and STICKING, most heifers (78.3%) and bulls (70.3%) showed at least one movement, whereas this was the case for less than half of the cows (47.2%). During the four-minute bleeding interval, 78.3% of heifers, 70.3% of bulls, and 62.3% of cows still showed at least one movement. In addition, concerning the frequency of movement categories, differences between sex categories were determined for certain categories. Both “twitching moderate” and “twitching intense” were observed, especially in cows (see Figure 5). According to the ANOVA, “body arching laterally” and “body arching ventrally” occurred significantly more in bulls and less in cows ($p < 0.001$). Forelimb movements occurred significantly more in heifers ($p < 0.001$).

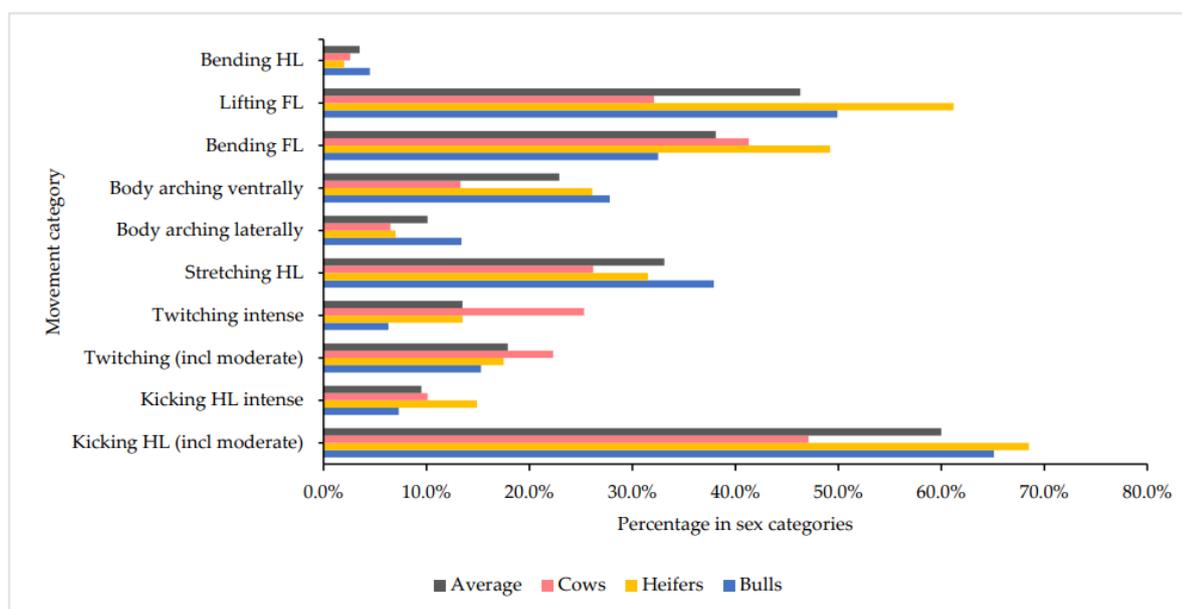


Figure 5. Relative frequency of the movement categories across all process intervals in relation to sex categories (cows, heifers, and bulls); HL = hind limb; FL = forelimb.

The results of the contingency test comparing the sex categories regarding movement frequencies by process intervals show that, especially at LANDING ($p < 0.001$), “twitching intense” occurred significantly more often in cows (22.8%) than in heifers (11.2%) or bulls (4.1%). At LANDING ($p < 0.001$) and HOISTING ($p < 0.001$), “kicking hind limb intense” was observed significantly more often in heifers (5.6%/11.2%) than in bulls (1.5%/5.9%). At STICKING ($p < 0.001$), “body arching ventrally” was recorded significantly more often for heifers (22.9%) and bulls (21.6%) than for cows (10.6%). “Lifting forelimb” in the FIRST MINUTE OF BLEEDING ($p < 0.001$) was observed significantly more often in heifers (42.4%) and bulls (33.2%) than in cows (18.7%).

Heifers had the highest average sum score. Despite the intensive movements at LANDING, across all process intervals cows had a lower average sum score (mean: 4.42) than heifers (mean: 6.06) or bulls (mean: 4.70). The ANOVA revealed a significant effect of sex category on the sum score ($p < 0.0001$), with least square means being significantly lower in cows (5.58) than in bulls (6.74) and heifers (6.90). However, in the ANOVAs used to check animal- and process-related impacts on scores, the variables examined explained only 10.0% to 12.0% of the score variability.

3.2.2. The Effect of Breed

Table 5 displays the frequency of movement categories for the most commonly represented breed types. Some breeds differed considerably regarding the category of movements and frequency of occurrence. “Twitching intense” during LANDING or HOISTING was shown especially by German Angus (GA: 21.4%, total: 13.5%), Black Holstein (20.6%), Red Holstein (19.4%), and Limousin (18.9%) but rarely by Brown Swiss (0.0%) and Simmental (3.5%). “Kicking hind limb intense” during LANDING and HOISTING was observed most frequently in Limousin (LIM: 16.7%, total: 9.6%) and Red Holstein (16.0%) and least frequently in Brown Swiss (2.0%). “Stretching hind limb” occurred particularly often in Limousin (LIM: 50.0%, total: 32.9%), and “body arching ventrally” occurred in German Angus and Charolais (see Table 5).

Table 5. Movement categories are shown by cattle following stunning across various breeds (relative frequency).

Breed Type	Kicking HL/Kicking HL Moderate	Kicking HL Intense	Twitching/Twitching Moderate	Twitching Intense	Stretching HL	Body Arching Laterally	Body Arching Ventrally	Bending FL	Lifting FL	Bending HL
Brown Swiss	53.0%	2.0%	9.0%	0.0%	28.0%	7.0%	21.0%	21.0%	45.0%	5.0%
Charolais	71.1%	11.1%	15.6%	15.6%	42.2%	11.1%	37.8%	53.3%	62.2%	6.7%
German Angus	71.4%	7.1%	42.9%	21.4%	33.3%	19.0%	40.5%	40.5%	57.1%	2.4%
German Red Pied	76.1%	11.9%	14.9%	9.0%	38.8%	14.9%	25.4%	43.3%	56.7%	6.0%
Simmental	58.5%	4.8%	10.4%	3.5%	39.9%	13.4%	25.9%	23.8%	44.7%	4.7%
Limousin	64.4%	16.7%	13.3%	18.9%	50.0%	10.0%	35.6%	35.6%	66.7%	2.2%
Red Holstein	54.9%	16.0%	16.0%	19.4%	23.3%	7.8%	22.3%	46.6%	57.8%	2.9%
Black Holstein	57.6%	11.7%	20.9%	20.6%	26.0%	8.3%	15.2%	43.8%	35.2%	3.1%
CBB	69.6%	4.0%	16.0%	9.6%	46.4%	12.0%	28.0%	35.2%	69.6%	5.6%
CBD	65.3%	8.0%	23.1%	6.4%	39.6%	11.1%	32.1%	38.7%	57.5%	2.4%
Total	60.2%	9.6%	18.1%	13.5%	32.9%	10.2%	22.7%	38.1%	46.2%	3.5%

FL = forelimb; HL = hind limb; CBB = crossbreed beef × beef; CBD = crossbreed beef × dairy.

The highest average sum score was measured for German Angus (mean: 6.46), followed by Charolais (mean: 6.04) and Limousin (mean: 5.91). Breeds with low sum scores covered Brown Swiss (3.21) and Simmental (mean: 3.88). The score at LANDING was highest in German Angus (mean: 1.29), Black Holstein (mean: 1.08), and Red Holstein (mean: 1.01).

The ANOVA revealed a significant impact of the breed type ($p < 0.0001$) on the sum score. The breeds Brown Swiss and Simmental significantly decreased, while German Angus increased the sum score. Least square means for German Angus (7.84), Charolais (7.35), Limousin (6.75), Black Holstein (6.52), Crossbreed Beef × Beef (6.43), Crossbreed Beef × Dairy (6.39), and Red Holstein (6.22) were significantly higher than for Simmental (4.98) and Brown Swiss (4.21).

An impact of the class of conformation (E-P) on the extent of movements was found regarding the score at HOISTING ($p < 0.01$), which was higher in cattle classified as moderately conformed (R-O). Class of conformation also affected the score at STICKING ($p < 0.01$). Here, low conformation (O-P) decreased the score. The effect of slaughter weight was less significant ($p < 0.05$). In the model (ANOVA), an increase in slaughter weight by 1.0 kg each lowered the sum score by 0.003 (mean: 4.87).

3.3. The Effect of Process-Related Factors on Movements

Of the process-related factors, only those related to stunning devices are presented here. The ANOVA did not show an effect of the stun-to-stick interval (mean: 44.6 s, min: 26.0 s, and max: 78.0 s).

The Effect of Captive Bolt-Related Factors

Of 2891 animals examined, 731 (bulls $n = 203$, heifers $n = 239$, and cows $n = 289$) were stunned with cartridge-powered captive bolt devices (KS Schermer[®] $n = 301$, KR Schermer[®] $n = 325$, KL Schermer[®] $n = 105$). The other 2160 animals (bulls $n = 1281$, heifers $n = 259$, and cows $n = 620$) were stunned with a pneumatically powered device (USSS-21 Jarvis[®] $n = 508$, VB 315 EFA[®] $n = 1652$). Overall, more movements were observed in cattle stunned with a cartridge-powered bolt gun than in cattle stunned with a pneumatic device. “Kicking hind limb intense” during LANDING and HOISTING, for example, occurred considerably more often in animals stunned with a cartridge-driven captive bolt (17.9%) than in animals stunned with a pneumatically powered device (6.6%). When comparing the two function types regarding movement frequencies by process intervals by means of contingency tests, i.e., without taking other effects into account (see Table 6), the described effect (cartridge-powered > pneumatic powered) often became significant ($p < 0.001$) for most movement categories and for the process intervals from HOISTING up to and including the FIRST MINUTE OF BLEEDING. An exception was “twitching moderate” at LANDING and HOISTING, which was observed more frequently for pneumatic guns (Table 6). However, most of the other movement categories, such as “kicking hind limb intense” at LANDING

and HOISTING, “kicking hind limb moderate” at LANDING and HOISTING, “kicking hind limb” in the FIRST MINUTE OF BLEEDING, and “lifting forelimb” from HOISTING to FIRST MINUTE OF BLEEDING, also occurred significantly more often in animals stunned with a cartridge-powered device.

Table 6. The results of the contingency test: relative frequency of movement categories by process interval and stunning device function type (pneumatic and cartridge).

Category of Movement	Landing		Hoisting		Skin Incision		Sticking		1st min. of Bleeding		2nd min. of Bleeding		3rd min. of Bleeding		4th min. of Bleeding	
	P	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P	C
Kicking HL; incl. moderate	7.4 *	11.2 *	11.3 *	19.8 *	12.7	11.6	27.1	24.9	26.6 *	38.6 *	2.2	1.9	1.0	0.8	3.2	5.1
Kicking HL intense	2.4 *	6.0 *	4.4 *	13.3 *												
Twitching incl. moderate	9.9 *	5.5 *	10.5 *	5.6 *	0.6	0.7	0.2	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Twitching intense	10.4	13.7	2.5	2.2												
Stretching HL	0.1	0.3	5.8 *	9.8 *	3.2	3.0	3.9	4.1	17.2	15.3	1.9	1.5	2.3	1.8	6.7	8.6
Body arching laterally	0.0	0.0	4.9	3.0	3.5	2.9	2.5	3.4	0.2 *	2.7 *	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Body arching ventrally	0.0	0.0	0.2	0.0	8.7 *	2.7 *	17.8	20.0	0.9	2.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
Bending FL	0.0	0.0	7.0	8.6	9.2	12.3	10.7 *	17.2 *	16.0 *	22.0 *	5.9	6.4	3.2	1.6	1.3	0.4
Lifting FL	0.0	0.0	1.5 *	3.1 *	8.3 *	14.0 *	11.6 *	17.6 *	28.2 *	36.1 *	4.4	4.8	1.0	0.0	0.7	0.5
Bending HL	0.0	0.0	0.7	1.0	0.7	0.3	0.3	0.8	0.6	0.7	0.4	0.1	0.5	0.3	0.5	0.4

P = pneumatically powered device; C = cartridge-powered device; FL = forelimb; HL = hind limb; * high statistical difference between function types ($p < 0.001$).

The average sum score was 5.68 for the cartridge-powered devices and 4.60 for the pneumatically powered devices. In particular, the greatest difference occurred between the pneumatically powered device VB-315 (mean: 4.34) and the two cartridge-powered devices KL (mean: 6.52) and KS (mean: 6.06).

The ANOVA revealed a significant impact of the function type ($p < 0.001$) on the sum score. In the model, the use of cartridge-powered stunners increased the sum score while the use of pneumatically powered stunners decreased it by 4.1. The exit length of the bolt had a decreasing impact on the frequency and intensity of movements (ANOVA, $p < 0.001$). In the statistical model, an increase in exit length by 1 mm reduced the sum score (mean: 4.87) by 0.044, and the score at LANDING (mean: 0.78) by 0.009. The effect of the bolt diameter was less clear ($p < 0.05$). In the model (ANOVA), increasing the bolt diameter by 1 mm increased the sum score (mean: 4.87) by 0.38 and the score at LANDING (mean: 0.78) by 0.26. The exit velocity of the bolt had an increasing effect on movements ($p < 0.001$). In the model (ANOVA), an increase in bolt velocity by 1 m/s increased the sum score by 0.07 and the score at LANDING by 0.03. This effect was only found if the function type (pneumatic or cartridge) and type of stunning device were not included in the analysis, as the effect was otherwise attributed to the function or type of device. A clear effect of bolt kinetic energy could not be shown by the ANOVA. An analysis of the decision trees revealed a lower sum score (mean: 4.43) for stunning devices with kinetic energy above 453 J (see Table 2) compared with devices with kinetic energy below 453 J (mean: 5.75). A similar effect was also found for the score at LANDING. Bulls stunned using devices of at least 488 J had a lower sum score at LANDING (mean: 0.32) than those stunned using devices with kinetic energy below 488 J (mean: 0.72).

3.4. The Effect of Stunning Quality on Movements

A total of 99.4% of the animals examined ($n = 2911$) were described as “sufficiently stunned” (bulls 99.5%, heifers 99.0%, and cows 99.3%). The stunning effect was stated as “doubtful” for 0.3% ($n = 9$: 3 bulls, 3 heifers, and 3 cows) and “insufficient” for 0.3% ($n = 10$: 5 bulls, 2 heifers, and 3 cows), of which only four cattle stayed conscious for a few seconds. Signs observed in animals called “doubtful” were twofold breathing move-

ments (recognised on muzzle or nostrils), nystagmus at the landing grid, and returning tension/movement of the tongue. Animals classified as “insufficiently” stunned showed repeated respiratory movements ($n > 4$) at the muzzle or nostrils, spontaneous eyelid closure, or lack of collapse following the shot together with focused eye movements. In one animal showing multiple respiratory movements of muzzle and jaw, as well as a tense eyelid during bleeding, ear tension was regained three minutes after sticking. In two other animals that showed repeated respiratory movements and/or tongue tone, persistent “body arching laterally” was observed as well, lasting until the THIRD MINUTE OF BLEEDING. These two animals were the only ones that still showed “body arching laterally” after the end of the SECOND MINUTE OF BLEEDING. A total of 17 animals were re-stunned by the staff. All animals classified as “insufficiently” stunned ($n = 10$) and most of the animals classified as “doubtful” were immediately re-stunned on the spot by the staff. After case-by-case analysis, the following potential causes were considered. In 6 of 19 animals with “doubtful” or “insufficient” stunning effects, angular and/or positional deviation of the shot position of more than 20° or more than 3 cm were recorded. In two cattle, slight angular deviations ($\leq 15^\circ$) were found together with slight deviations in shot position (≤ 2 cm). One animal had an abnormal swelling of the os frontale. In four other cases, it was suspected that the stunning device used (Schermer KS, Freund Maschinenfabrik GmbH & Co. KG, Paderborn, Germany) might not have been strong enough in relation to body weight. For the remaining six cases, no possible reason for reduced effectiveness could be identified. Overall ($n = 2911$), deviations in shooting position (≥ 2 cm from the ideal position) and/or angle ($\geq 10^\circ$) were found in 21.1% ($n = 614$) of the cattle and we obtained indications for thereby increasing effects on movements. The sum score increased with increasing distance from the ideal shot position (< 2 cm: mean 4.81; ≥ 2 cm: mean 5.46; ≥ 3 cm: mean 5.39; and ≥ 4 cm: mean 6.0). In the model (ANOVA), increasing the shot deviation by 1 cm increased the score at HOISTING (mean: 0.90) by 0.11 ($p < 0.001$). An increase in the sum score was also seen with angular deviations of more than 20° (mean: 5.35) compared with animals with angular deviations of less than 10° (mean: 4.85).

Due to the very small number of animals with the stunning effect stated as “doubtful” or “insufficient” ($n = 19$), no statistics are possible regarding the impact of stunning effectiveness on the sum score or the occurrence of certain movement categories. Proceeding purely descriptively, the sum score of the cattle categorised as “doubtful” (mean: 6.44, minimum: 3.00, and maximum: 10.00) or “insufficient” (mean: 5.90, minimum: 1.00, and maximum: 12.50) is comparable to the entire study group (mean: 4.87, minimum: 0.00, and maximum: 20.50). All movements observed during this investigation occurred in both well-stunned cattle and cattle with reduced stunning effectiveness.

4. Discussion

4.1. Occurrence of Movements

In this study, the analyses of movements show that after captive bolt stunning, there were hardly any cattle that did not show any movements at all. Overall, movements were observed in 93.4% of all cattle during at least one process interval. Most movements occurred during sticking (58.0%) and during the first minute of bleeding (61.7%). This could be attributed to the continued seizure activity after the shot [10,27] and the simultaneous reduction of inhibitory effects by higher brain centres already damaged by the effect of the captive bolt stun [28], while major manipulations such as hoisting and sticking could act as external triggers. This is in line with the results of Hilsenbeck [14] and those of von Holleben and von Wenzlawowicz [15]. Both studies report the proportion of cattle with movements during hoisting, sticking, and bleeding between 51.0% and 65.0%. In our study, a significant proportion of animals (12.2%; between 9.1% (bulls) and 14.4% (cows)) were found to still show movements in the fourth minute of bleeding. As well as described by Hilsenbeck [14] we observed that “stretching hind limb”, often in combination with shivering, was the most frequent movement during advanced exsanguination. Before these late movements occurred, cattle were usually already hanging completely relaxed with

their tails hanging limply. This was also the case in one animal that was moving eight minutes after sticking. Our results show that all movements, including neck and back movements such as “body arching ventrally” (22.4%) and “body arching laterally” (10.0%), regularly occur in unconscious cattle after captive bolt stunning. In practice, however, the latter movements are often equated with “arching backwards”. Nevertheless, only “arching backwards” is a form of righting reflex [25,29], an active attempt of the animal to bring the head and body into a normal position, requiring a functional medulla and midbrain [30] and thus indicating the return of consciousness. “Body arching ventrally” in this study and in that by Terlouw et al. [17] was observed predominantly during sticking. In almost all cases, it occurred as a reflex-like response to the cutting of skin, muscles, and blood vessels. The fact that this movement was only very rarely observed without previous manipulation, e.g., during exsanguination, again confirms the trigger effect of manipulation. In this study, “body arching ventrally” was observed only four times during the second to third minute of bleeding, mainly at abattoir B, which was the only facility using a sticking knife with a hollow handle for blood collection. The late occurrence of “body arching ventrally” at this abattoir during bleeding could, therefore, be a consequence of the manipulation when removing the sticking knife. “Body arching laterally” in our study was observed predominantly during hoisting and in connection with the tonic phase, a typical sign for well-stunned animals after captive bolt stunning, during which the muscles of the back and legs are rigid and the hind limbs are flexed [27]. These clonic-tonic seizures typically occur following captive bolt stunning and may vary in duration [31]. Due to the use of modern stun boxes, nowadays cattle are often already shackled and hoisted during the tonic phase, which fosters the occurrence of “body arching laterally” [15]. In only two animals was “body arching laterally” observed during the third minute of bleeding.

4.2. Animal-Related Impact Factors on Movements

Our analyses demonstrate that the frequency of movements varies with regard to both sex category and breed. In particular, German Angus, Black Holstein, and Red Holstein exhibited a high movement score during landing, which may impede shackling. We confirmed the field experience that cows show especially strong movements such as “kicking hind limb intense” at landing. However, across all process intervals, cows moved less (mean sum score: 5.58) than heifers or bulls (mean sum score: 6.90 and 6.74, respectively), as from hoisting onwards they already showed less frequent movements. Our results are similar to those of von Holleben and von Wenzlawowicz [15], who recorded movements in 55.0% of bulls, 61.0% of heifers, and 51.0% of cows. Differences between sex categories regarding the frequency of certain movements were another result of our investigation, e.g., 30.6% of the bulls showed “body arching ventrally”, while this movement was only observed in 22.7% of cows. The latter, on the other hand, showed “twitching intense” significantly more often (23.2%) than did heifers (13.7%) or bulls (10.4%). By contrast, Terlouw et al. [17] did not find any clear differences between sex categories regarding type and frequency of movements, possibly because of the significantly smaller sample size ($n = 40$) in their study. Our results also differ compared with those of Hilsenbeck [14] regarding the frequency of “kicking hind limb” during hoisting, which was observed in 55.7% of cattle, while our results show a prevalence of 20.3% in cattle (18.8% bulls, 27.7% heifers, 18.7% cows). This could be attributed to the different groups of animals investigated or the exclusive use of cartridge-powered stunners in the study by Hilsenbeck [14]. However, the results are similar with regard to movements at sticking, with 34.3% of the cattle not showing any movements in Hilsenbeck [14], compared with 41.6% in the present study. Furthermore, we observed an impact of breed type on the sum score, as well as on the occurrence of certain movement categories. During hoisting, “kicking hind limb” was observed significantly more often in dairy cattle (e.g., Black Holstein) than in beef or cross breeds. Similar results were obtained by Martin et al. [16]. Results by Kline et al. [22] and von Holleben and von Wenzlawowicz [15] show that, especially during landing, strong movements like “twitching intense” and “kicking hind limb intense” occur more often

in dairy breeds (Black and Red Holstein). Despite the high score for dairy breeds during hoisting and especially landing, we calculated a higher sum score for breeds like German Angus than for Black or Red Holstein. This is due to the finding that movements in German Angus lasted longer and, therefore, occurred over more process intervals than those in dairy breeds. A lower sum score than that for German Angus (mean: 6.46), Limousin (mean: 5.91), or Charolais (mean: 6.04) was obtained for Brown Swiss cattle (mean: 3.21). Skull anatomy features may have influenced the extent of movements, but our data do not provide conclusive evidence. For instance, Simmental and German Angus bulls share comparable skull anatomy but their sum scores differ significantly. A possible impact factor could be the animals' temperament or the state of excitement/stress level just before stunning. Both physical exertion and pre-slaughter stress cause an increased muscle metabolism shortly after death [32] and could, therefore, affect the expression of spinal cord reflexes and automatisms. According to Grandin and Deesing [33], certain "Common Continental European breeds", such as Limousin and Charolais, are known to be nervous and flighty. The observations made during our study indicate that temperament and stress impact could be important, without these two parameters explicitly being monitored.

4.3. Captive Bolt-Related Impact Factors on Movements

The effects of features of the stunning devices on movements cannot always be completely separated from each other. Our research showed that cattle stunned using pneumatically powered devices (mean sum score: 4.60) moved less than those stunned using cartridge-powered guns (mean sum score: 5.68). One possible reason for this could be the higher bolt velocity of cartridge-powered stunners. Pneumatically powered devices also differ from cartridge-powered devices in terms of their kinetic energy. The mass of the bolt is significantly higher for pneumatically powered guns, which, despite a lower bolt speed, results in higher kinetic energy than for cartridge-powered stunners. According to our study (analyses of decision trees), for a higher kinetic energy (>453 J), the average sum score—a measure of the frequency and intensity of movements—was lower. It is possible that, due to their higher kinetic energy, pneumatically powered devices caused more damage to the brain, especially the brainstem and upper spinal cord, thus reducing the occurrence of medullary and spinal reflexes. However, another reason for the more extensive damage in pneumatically stunned animals could be the use of a closer head restraint, which is usually practised when using pneumatic guns. As there is hardly any space left for the head to move while being shot, energy is transferred directly to the skull and brain without loss. By contrast, if hand-held cartridge-powered stunners are used, the heads of the animals are often not restrained as tightly, and kinetic energy may be lost if the head swerves on impact. The assumption that more pronounced damage in deep brain structures may reduce movements is also supported by the fact that in our analyses, an increasing exit length of the bolt was associated with a significantly lower sum score or score at hoisting. A longer bolt penetrates deeper into the brain, thus causing more extensive damage to deeper brain structures. However, our results regarding exit length are not in line with those by Martin et al. [16], who observed more "kicking hind limb" with increasing penetration depth in Holstein cattle. Martin et al. [16], however, considered just "kicking hind limb" and only in the period from hoisting to sticking, which may explain the deviating results, along with differences in the group of animals studied, captive bolt devices used, and the lack of head restraint when using a centre track conveyor restrainer system.

4.4. Stunning Quality

In this study, a "doubtful" or "insufficient" stunning effectiveness was found in only 0.6% of the cattle. This is a remarkable improvement compared with previous studies. For the period 2003 to 2012, rates of failed stunning were reported at 4.0% to 9.2% [7–11,34]. Dörfler [12] estimated the proportion of inadequately stunned cattle to be only between 0.9% and 1.9%, rising to 5.7% in exceptional cases. This trend is presumably due to the

further development and improved maintenance of captive bolt stunning devices [35], the establishment of modern stun boxes with tight head restraints, and increasing animal welfare monitoring at abattoirs. The presence of the investigators may also have positively affected the performance of the staff performing the stunning. When using well-maintained modern captive bolt devices, slight deviations in position or angle do not necessarily lead to a reduced stunning effect [36,37], which is also confirmed by our results, as we found deviations in position or angle in 614 (21.1%) heads but only 19 out of 2911 showed signs of a reduced stunning effect. However, our results, as well as those of Ilgert [38] and Kaegi [39], indicate that, independently of stunning effectiveness, an increased deviation in shooting position or angle may lead to more movements.

Our results demonstrate that movements occur regularly in cattle that simultaneously show no signs of an active brainstem such as eye or respiratory movements. This is in line with previous studies, such as the work of Fricker and Riek [20], who confirmed that convulsive activity still occurs in cattle with absent brain function (isoelectric EEG). Convulsions result from the failure of higher-level motor control centres in the brain, thus being incompatible with a simultaneously maintained consciousness [18,28,40]. Therefore, the mere presence of movements is not suitable to distinguish between consciousness and unconsciousness [29]. Concerning “arching backwards”, which in cattle always indicates an insufficient stunning effect [25], studies by McKinstry and Anil [41] and Grandin [42] show that cattle when regaining consciousness first show a resumption of respiration or a positive corneal reflex before exhibiting righting reflex and attempts to raise their heads.

In this study, none of the animals showed “arching backwards”. With regard to “body arching laterally”, another movement often mistaken for the righting reflex, our investigation revealed that this movement occurs in 10.0% ($n = 291$) of all animals, mainly during hoisting and sticking, but in nearly all cases within two minutes after sticking. At this time, the animal may still show tonic–clonic seizures following the stun. In only two animals were “body arching laterally” still observed during the third minute of bleeding. These two animals also expressed signs of reduced stunning effectiveness, i.e., respiratory movements and/or tongue tone. However, based on these two single cases, we would not recommend late “body arching laterally” as a sole indicator of an inadequate stunning effect, but the occurrence of this movement after the end of the second minute of bleeding should lead to intensive monitoring for signs of an active brainstem.

An association between stunning effectiveness and movements cannot be statistically proven in this study due to the small number of animals with reduced stunning effectiveness. However, when looking at the movements monitored and scores calculated in cattle showing signs of shallow depth of stunning, these are comparable to those of properly stunned cattle when analysed on a case-by-case analysis.

Based on these results, the authors would like to emphasise the importance of paying attention to reliable indicators such as eye movements and/or resumption of breathing to evaluate stunning effectiveness, and not to be distracted by, e.g., kicking movements of the limbs or lateral body arching. The indicators have to be assessed in context and not just considered individually. The results show that movements occur regularly in properly stunned cattle.

4.5. Limitations

Due to technical reasons, we could not precisely measure the efficiency of the exsanguination, which could have had an effect either on stunning effectiveness or on movements. However, all staff involved were experienced and promptly repeated sticking if reduced blood flow was suspected. Another possible limitation in this study is that the values for the key parameters of bolt exit length and bolt velocity could only be approached and thus were not measured for every single shot. Currently, there is no technical solution to measure bolt velocity during the shot. Regarding the bolt exit length, examining a section of the skull of every animal would have been a possible solution, but this could not be included because of limitations in resources. As stated above, due to the small number of animals

showing signs of reduced stunning effectiveness, only case-by-case analysis was possible concerning an association between stunning effectiveness and movements. Nevertheless, considering the current state of scientific knowledge, we assume that indicators other than movement are far more important for evaluating the effectiveness of stunning in cattle after captive bolt stunning.

4.6. Animal Welfare Implications

This description and analysis of movements can contribute to assessing the stunning effectiveness of cattle after captive bolt stunning more reliably. According to our results, most movements observed are not suitable to determine an insufficient stunning effect. When assessing stunning efficiency, we recommend looking for signs at the head such as breathing, eye movements, or recurrent ear tension since other movements like leg and body movements can still occur a few minutes after sticking in well-stunned cattle. The identification of the factors influencing these movements can contribute to understanding the movements, optimising the stunning process, and the further development of stunning devices. In order to correctly assess movements, the staff responsible for slaughter should be able to distinguish between conscious righting attempts and unconscious body or limb movements. Impressive movements after stunning should not divert the attention of those responsible for detecting the pertinent signs of reduced stunning effectiveness, which are comparatively inconspicuous. On the other hand, movements can have an impact on animal welfare when they impede prompt shackling and sticking, thereby posing challenges for employees in efficiently and safely performing these tasks. This aspect must be considered, as staff play a key role in maintaining high animal welfare standards during slaughter. Therefore, it is necessary to continue looking for ways to reduce movements.

5. Conclusions

For the first time, movements in cattle after captive bolt stunning were categorised and systematically described from landing up to at least the end of the fourth minute of bleeding. A total of 93.4% of all cattle examined showed at least one movement within the observation period. Although most cattle movements ended one minute after sticking, there were individual animals that showed movements for even longer, sometimes up to eight minutes after sticking. Factors affecting the category and frequency of movements could be identified, in relation to both the animals and the features of the captive bolt devices used. Breed, sex category, and the exit length and function type of the stunning device were the main impact factors found. The common field experience of Black and Red Holstein cows showing especially strong movements during landing and hoisting was confirmed. In total, 48.9% of all cows showed movements on the landing grid, whereas related to the whole observation period, bulls and heifers had a higher movement activity (sum score) than cows. Factors related to the stunning device also had an impact on movements. Both the use of pneumatically powered devices and the use of captive bolt guns with an increased exit length resulted in a significantly lower sum score. However, the variables investigated explain only 12% of the variance; thus, the effects of unknown confounding variables cannot be excluded.

Excitatory movements at landing hinder the ability of employees to quickly and safely perform hoisting and sticking. As the occurrence and intensity of movements are only explained to a limited extent by the identified process-related factors, it is necessary to continue looking for ways to reduce movements from landing to sticking.

Out of 2911 cattle, 99.4% showed no signs of reduced stunning effectiveness. This positive development in enhanced stunning effectiveness is attributed to, among other things, the use of modern stunning devices (esp. pneumatic-driven stunners) and stun boxes with tight head restraint. Thus, slight angular or positional shooting deviations do not necessarily lead to a reduced stunning effect. Movements of limbs or the tail, as well as lateral or ventral movements of the head and/or trunk, do not indicate limited stunning effectiveness. Only “body arching laterally” still being expressed in the third minute of

bleeding might be an indication for insufficient stunning and bleeding, but it should only be considered together with respiratory movements or preserved eye reflexes. It is assumed that after successful captive bolt stunning in cattle, movements commonly occur for several minutes after the shot and, with the exception of “arching backwards”, are not a suitable sole indicator of reduced stunning effectiveness. In terms of animal welfare, it is crucial to accurately recognize signs of reduced stunning effectiveness. Staff, veterinarians, and external inspectors should prioritize signs of an active brainstem over limb, body, and tail movements. Ensuring the correct identification of signs of remaining or regaining consciousness is a key factor in guaranteeing animal welfare at slaughter.

Supplementary Materials: With regard only to the definition of movements, the following supporting information (video examples) can be downloaded at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10572807> (accessed on 19 March 2024), Video S1: 1 Kicking hind limb moderate landing unconscious cow; Video S2: 2 Twitching intense landing unconscious cow; Video S3: 3 Kicking hind limb intense landing unconscious cow; Video S4: 4 Twitching moderate hoisting unconscious bull; Video S5: 5 Twitching intense hoisting unconscious bull; Video S6: 6 Body arching laterally hoisting unconscious heifer; Video S7: 7 Stretching hind limb hoisting lifting forelimb sticking unconscious bull; Video S8: 8 Body arching ventrally kicking hind limb sticking 1st min of bleeding unconscious bull; Video S9: 9 Body arching laterally 1st min of bleeding unconscious bull; Video S10: 10 Body arching ventrally bending hind and forelimbs 1st min of bleeding unconscious heifer; Video S11: 11 Lifting forelimb kicking hind limb 1st min of bleeding unconscious bull; Video S12: 12 Bending hind limb 3rd minute of bleeding unconscious bull; Video S13: 13 Bending forelimb bending hind limb 4th minute of bleeding unconscious cow; Video S14: 14 Stretching hind limb with shivering sixth min of bleeding unconscious cow; Figure S1: 15 Arching backwards.

Author Contributions: Conceptualization, K.v.H. and M.v.W.; methodology, A.L. and K.v.H.; software, K.v.H. and M.v.W.; validation, A.L., K.v.H., H.L. and M.v.W.; formal analysis, A.L.; investigation, A.L., K.v.H. and M.v.W.; resources, K.v.H. and M.v.W.; data curation, A.L.; writing—original draft preparation, A.L.; writing—review and editing, K.v.H. and H.L.; visualization, A.L. and K.v.H.; supervision, K.v.H., H.L. and M.E.; project administration, K.v.H.; funding acquisition, K.v.H. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the Federal Ministry of Food and Agriculture (Germany) (BMEL) based on a decision of the Parliament of the Federal Republic of Germany via the Federal Office for Agriculture and Food (BLE), project code 2817801X18.

Institutional Review Board Statement: Ethical review and approval were waived for this study due to reason This study did not involve procedures on animals requiring formal approval from an animal ethics committee. All data collection occurred during and after routine slaughter, with all animals intended for use in the food chain. Thus, this study did not constitute an animal experiment in terms of the German Animal Welfare Act [43]. The observations were conducted without any interference with the animals. The video material was produced in a written agreement with the respective abattoirs and the competent authorities.

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from all subjects involved in this study.

Data Availability Statement: The data are not publicly accessible due to security concerns for the companies involved. Further enquiries can be directed to the author.

Acknowledgments: We particularly thank the participating slaughter companies for their great cooperation, Jarvis GmbH, Buchholz in der Nordheide, and PTB Braunschweig for providing the measuring instruments and technical assistance, as well as the Max Rubner Institute for statistical support.

Conflicts of Interest: The funders had no role in the design of this study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results. The authors declare no conflicts of interest.

References

1. EFSA. *Welfare of Cattle at Slaughter*; 1831-4732; EFSA Panel on Animal Health Welfare: Parma, Italy, 2020; p. e06275.
2. Council Regulation (EC) No 1099/2009 of 24 September 2009 on the protection of animals at the time of killing. 2009, 1–30. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32009R1099> (accessed on 3 April 2024).
3. Grist, A.; Lines, J.A.; Bock, R.; Knowles, T.G.; Wotton, S.B. An Examination of the Performance of Blank Cartridges Used in Captive Bolt Devices for the Pre-Slaughter Stunning and Euthanasia of Animals. *Animals* **2019**, *9*, 552. [CrossRef]
4. Tierschutz-Schlachtverordnung. TierSchlV-Verordnung zum Schutz von Tieren im Zusammenhang mit der Schlachtung oder Tötung zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 1099/2009 des Rates. *BGBI* **2012**, *1*, 2982. Available online: https://www.gesetze-im-internet.de/tierschlV_2013/ (accessed on 1 November 2023).
5. Commission Regulation (EC) No 1326/2001 of June 2001 laying down transitional measures to permit the changeover to the Regulation of the European Parliament and of the Council (EC) No 999/2001 laying down rules for the prevention, control and eradication of certain transmissible spongiform encephalopathies, and amending Annexes VII and XI to that Regulation. (2000/418/EG). 2001, pp. 60–67. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:32001R1326> (accessed on 1 November 2023).
6. Von Holleben, K.; Schütte, A.; von Wenzlawowicz, M.; Bostelmann, N. Call for veterinary action in slaughterhouses-deficient welfare at CO₂-stunning of pigs and captive bolt stunning of cattle. *Fleischwirtsch. Int.* **2002**, *3*, 8–11.
7. Gregory, N.G.; Lee, C.J.; Widdicombe, J.P. Depth of concussion in cattle shot by penetrating captive bolt. *Meat Sci.* **2007**, *77*, 499–503. [CrossRef] [PubMed]
8. Troeger, K.; Moje, M. Zero percent stunning failure rate? New equipment for captive bolt stunning of cattle shows convincing effect. *Fleischwirtschaft* **2012**, *92*, 26–29.
9. Von Wenzlawowicz, M.; von Holleben, K.; Eser, E. Identifying reasons for stun failures in slaughterhouses for cattle and pigs: A field study. *Anim. Welf.* **2012**, *21*, 51–60. [CrossRef]
10. EFSA. *Opinion of the Scientific Panel on Animal Health and Welfare on a Request from the Commission Related to Welfare Aspects of the Main Systems of Stunning and Killing the Main Commercial Species of Animals*; Question N° EFSA-Q-2003-093; EFSA: Parma, Italy, 2004; pp. 1–29.
11. Endres, J.M. Effectiveness of Concussion Stunning in Comparison to Captive Bolt Stunning in Routine Slaughtering of Cattle. Ph.D. Thesis, Ludwig-Maximilians-Universität München, Munich, Germany, 2005.
12. Dörfler, K. Assessment of the Efficiency of Different Captive Bolt Stunning Devices in Cattle and Their Influence on the Degree of Bleeding. Ph.D. Thesis, Universität Leipzig, Leipzig, Germany, 2015.
13. Grandin, T.; Velarde, A.; Strappini, A.; Gerritzen, M.; Ghezzi, M.; Martinez-Burnes, J.; Hernandez-Avalos, I.; Dominguez-Oliva, A.; Casas-Alvarado, A.; Mota-Rojas, D. Slaughtering of Water Buffalo (*Bubalus bubalis*) with and without Stunning: A Focus on the Neurobiology of Pain, Hyperalgesia, and Sensitization. *Animals* **2023**, *13*, 2406. [CrossRef]
14. Hilsenbeck, E.M. Examinations of Bleeding-Time in Cattle after Captive Bolt Stunning. Ph.D. Thesis, Ludwig-Maximilians-Universität München, Munich, Germany, 2007.
15. Von Holleben, K.; von Wenzlawowicz, M. Are movements after captive bolt stunning of cattle a sign of regaining consciousness. In Proceedings of the 65th ICoMst 2019, Berlin, Germany, 4 August 2019; pp. 1–4.
16. Martin, M.S.; Kline, H.C.; Wagner, D.R.; Alexander, L.R.; Edwards-Callaway, L.N.; Grandin, T. Evaluation of different captive bolt lengths and breed influence upon post-stun hind limb and forelimb activity in fed cattle at a commercial slaughter facility. *Meat Sci.* **2018**, *143*, 159–164. [CrossRef] [PubMed]
17. Terlouw, E.M.; Bourguet, C.; Deiss, V.; Mallet, C. Origins of movements following stunning and during bleeding in cattle. *Meat Sci.* **2015**, *110*, 135–144. [CrossRef]
18. Verhoeven, M.T.W. Assessing Unconsciousness in Livestock at Slaughter. Ph.D. Thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 2016.
19. Grillner, S.; Wallén, P.; Saitoh, K.; Kozlov, A.; Robertson, B. Neural bases of goal-directed locomotion in vertebrates—An overview. *Brain Res. Rev.* **2008**, *57*, 2–12. [CrossRef]
20. Fricker, C.; Riek, W. Using a captive bolt pistol to stun cattle before slaughter. *Fleischwirtschaft* **1981**, *61*, 124–127.
21. Gibson, T.J.; Oliveira, S.E.O.; Costa, F.A.D.; Gregory, N.G. Electroencephalographic assessment of pneumatically powered penetrating and non-penetrating captive-bolt stunning of bulls. *Meat Sci.* **2019**, *151*, 54–59. [CrossRef] [PubMed]
22. Kline, H.C.; Wagner, D.R.; Edwards-Callaway, L.N.; Alexander, L.R.; Grandin, T. Effect of captive bolt gun length on brain trauma and post-stunning hind limb activity in finished cattle *Bos taurus*. *Meat Sci.* **2019**, *155*, 69–73. [CrossRef]
23. EFSA AHAW Panel. Scientific Opinion on monitoring procedures at slaughterhouses for bovines. *EFSA J.* **2013**, *11*, 3460. [CrossRef]
24. Von Holleben, K.; Luecking, A.; von Wenzlawowicz, M. Signs of reduced stunning effectiveness in cattle and presentation of open access animations. In Proceedings of the 4th Annual Meeting of the European Veterinary Congress of Behavioural Medicine and Animal Welfare Palma, Mallorca, Spain, 28 September 2022.
25. Grandin, T.; Cockram, M. *The Slaughter of Farmed Animals: Practical Ways of Enhancing Animal Welfare*; Grandin, T., Cockram, M., Eds.; CABI International: Wallingford, UK, 2020.
26. Welfare Quality®. *Assessment Protocol for Cattle*; Welfare Quality®: Lelystad, The Netherlands, 2009.

27. Gregory, N.G. Physiology of Stress, Distress, Stunning and Slaughter. In *Animal Welfare and Meat Science*; Gregory, N.G., Ed.; CAB International: Wallingford, UK, 1998; pp. 64–92.
28. Terlouw, C.; Bourguet, C.; Deiss, V. Consciousness, unconsciousness and death in the context of slaughter. Part I. Neurobiological mechanisms underlying stunning and killing. *Meat Sci.* **2016**, *118*, 133–146. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
29. Terlouw, C.; Bourguet, C.; Deiss, V. Consciousness, unconsciousness and death in the context of slaughter. Part II. Evaluation methods. *Meat Sci.* **2016**, *118*, 147–156. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
30. Magnus, R. Some results of studies in the physiology of posture II. *Lancet* **1926**, *2*, 585–588.
31. EFSA. *Scientific Opinion—Guidance on the Assessment Criteria for Studies Evaluating the Effectiveness of Stunning Interventions Regarding Animal Protection at the Time of Killing*; EFSA Panel on Animal Health and Welfare (AHAW); European Food Safety Authority (EFSA): Parma, Italy, 2013; p. 41.
32. Terlouw, E.M.C.; Bourguet, C.; Deiss, V. Stress at slaughter in cattle: Role of reactivity profile and environmental factors. *Anim. Welf.* **2012**, *21*, 43–49. [[CrossRef](#)]
33. Grandin, T.; Deesing, M. Genetics and Learned Behavior. In *Humane Livestock Handling*; Boyd-Owens, R., Burns, D., Guare, S., Eds.; Storey Publishing: North Adams, MA, USA, 2008; pp. 16–30.
34. Marzin, V.; Collobert, J.F.; Jaunet, L.; Marrec, L. Critères pratiques de mesure de l'efficacité et de la qualité de l'étourdissement par tige perforante chez le bovin. *Rev. Med. Vet.* **2008**, *159*, 423–430.
35. Gibson, T.J.; Mason, C.W.; Spence, J.Y.; Barker, H.; Gregory, N.G. Factors affecting penetrating captive bolt gun performance. *J. Appl. Anim. Welf. Sci.* **2015**, *18*, 222–238. [[CrossRef](#)]
36. Algers, B.; Atkinson, S. Stun quality in relation to cattle size, gun type and brain hemorrhages. In Proceedings of the 13th International Congress in Animal Hygiene, Tartu, Estonia, 17 June 2021; pp. 1028–1031.
37. Atkinson, S.; Velarde, A.; Algers, B. Assessment of stun quality at commercial slaughter in cattle shot with captive bolt. *Anim. Welf.* **2013**, *22*, 473–481. [[CrossRef](#)]
38. Ilgert, H. Effizienz der Bolzenschußbetäubung beim Rind mit Berücksichtigung der Einschußstelle und der Eindringrichtung des Bolzens unter Praxisbedingungen. Ph.D. Thesis, Freie Universität Berlin, Berlin, Germany, 1985.
39. Kaegi, B. Untersuchung zur Bolzenschussbetäubung beim Rind. Ph.D. Thesis, Universität Zuerich, Zuerich, Switzerland, 1988.
40. Maennl, M. Betäubung und Entblutung von Schwein und Rind. *Mitteilungsblatt-Bundesanst. Für Fleischforsch. Kulmb.* **1994**, *1*, 347–347.
41. McKinstry, J.L.; Anil, M.H. The effect of repeat application of electrical stunning on the welfare of pigs. *Meat Sci.* **2004**, *67*, 121–128. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
42. Grandin, T. How to determine insensibility (unconsciousness) in cattle, pigs, and sheep in slaughter plants. 2015, revised June 2017. Available online: <http://www.grandin.com/humane/insensibility.html> (accessed on 15 March 2024).
43. Animal Protection Act. Federal Act on the Protection of Animals (Animal Protection Act–TSchG). 2020. Available online: <https://www.gesetze-im-internet.de/tierschg/BJNR012770972.html> (accessed on 3 April 2024).

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

5 Erweiterte Studienergebnisse

Aufgrund von technisch bedingten kurzzeitigen Unterbrechungen der Videoaufzeichnung mussten einzelne Tiere bei der Analyse der Einflussfaktoren aus der Untersuchungsgruppe ausgeschlossen werden, wodurch diese von ursprünglich $n = 2.911$ Rinder auf $n = 2.891$ Rinder reduziert wurde.

Der Einfluss tierbezogener Faktoren wie Rasse, Produktionsgruppe, Klassifizierung, Schlachtgewicht und gerätebezogener Faktoren, wie Funktionsart, Gerätetyp, Bolzendurchmesser, Austrittslänge, Geschwindigkeit und kinetische Energie auf die Bewegungen und den Summen Score sind im Abschnitt „Publizierte Studienergebnisse“ beschrieben.

5.1 Erweiterte Einflussfaktoren auf Bewegungen bei Rindern nach Bolzenschuss

5.1.1 Einfluss prozesstechnischer Parameter auf die Bewegungen

Neben den im publizierten Studienteil beschriebenen tierbezogenen und gerätebezogenen Faktoren wurden auch der Einfluss des Schlachtbetriebs, der betäubenden Person und des Untersuchungszeitpunkts (Saison) auf das Bewegungsverhalten der Rinder nach der Betäubung analysiert.

5.1.1.1 Schlachtbetrieb

Auf Betrieb A wurden anteilmäßig die meisten Rinder der Untersuchungsgruppe geschlachtet (25,9 %), auf Betrieb E die wenigsten (12,6 %). Die Verteilung der Rinder nach Produktionsgruppen (Bullen, Färsen und Kühe) und Betrieb ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2. Verteilung der untersuchten Rinder aufgeteilt nach Produktionsgruppe (Bulle, Färse, Kuh) auf die Betriebe (A-E).

Betrieb & Produktionsgruppe		Anzahl untersuchter Rinder	Anzahl untersuchter Rinder in Prozent
A		750	25,9 %
	Bulle	306	10,6 %
	Färse	143	4,9 %
	Kuh	301	10,4 %
B		508	17,6 %
	Bulle	311	10,8 %
	Färse	105	3,6 %
	Kuh	92	3,2 %
C		653	22,6 %
	Bulle	401	13,9 %
	Färse	56	1,9 %
	Kuh	196	6,8 %
D		615	21,3 %
	Bulle	390	13,5 %
	Färse	30	1,0 %
	Kuh	195	6,7 %
E		365	12,6 %
	Bulle	76	2,6 %
	Färse	164	5,7 %
	Kuh	125	4,3 %
Gesamtergebnis		2.891	100,0 %

Beim Vergleich der Mittelwerte des Summen Scores zeigte sich, dass Betrieb E im Mittel den höchsten Summen Score aufwies und damit die meisten Bewegungen, wohingegen in den Betrieben C und D der durchschnittliche Summen Score am niedrigsten ausfiel (siehe Abbildung 9). Im statistischen Modell (ANOVA) ergab sich jedoch kein signifikanter Einfluss des Betriebes auf den Summen Score.

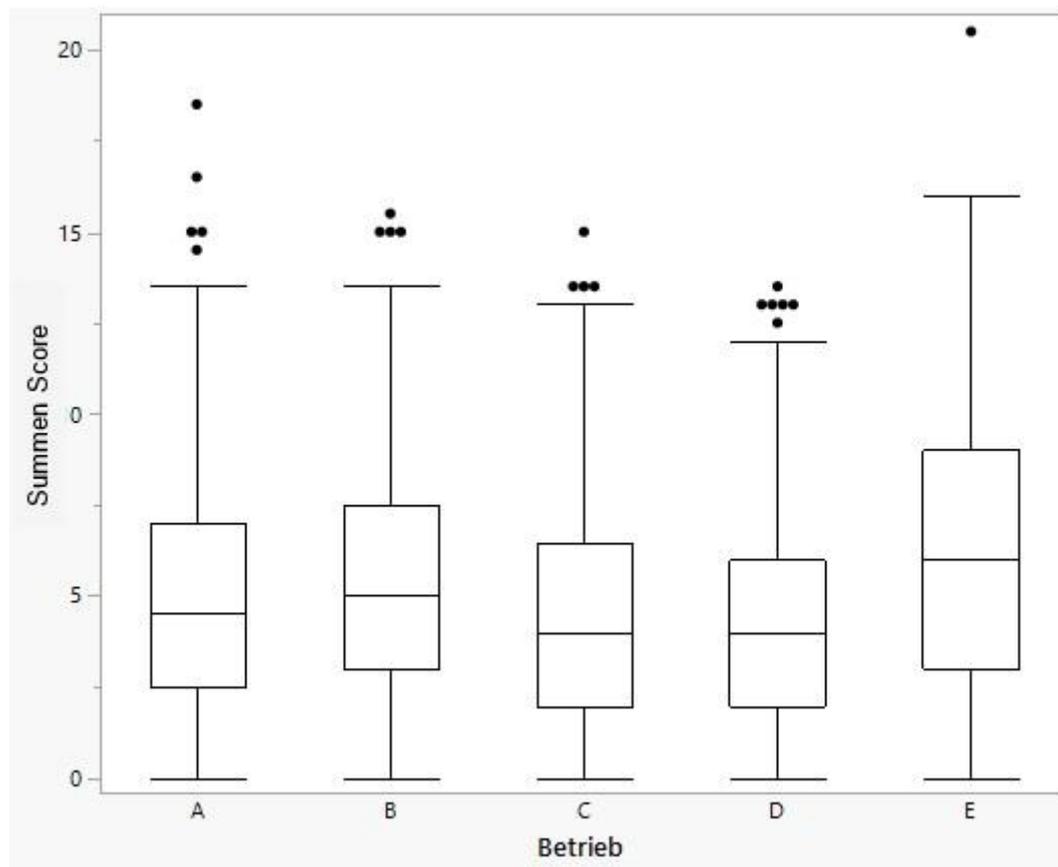


Abbildung 9. Lagemaße zum Summen Score der jeweiligen Untersuchungsgruppen auf den verschiedenen Betrieben (A-E). Der Summen Score ergibt sich aus den Scores der acht einzelnen Prozessintervalle (Auswurf bis 4. Minute der Entblutung), die jeweils die Gesamtsumme der Scorewerte aller beobachteten Bewegungen in diesem Intervall darstellen. Jeder Bewegung wurde entsprechend ihrer Intensität einem Score zwischen 0,5 und 3 zugeordnet.

5.1.1.2 Betäubende Person

Während der Untersuchungen führten insgesamt 14 verschiedenen Personen die Betäubung der Rinder an den fünf Schlachtbetrieben durch, wobei sich die Anzahl der eingesetzten Mitarbeiter zwischen den Betrieben unterschied (Tabelle 3, Minimum 2, Maximum 4). Im Durchschnitt wurden 207 Rinder von jeder betäubenden Person betäubt, wobei diese Anzahl bei zwei Personen signifikant geringer war (1x 17 Rinder, 1x 2 Rinder). Die genaue Verteilung betäubter Rinder je betäubende Person ist in der nachfolgenden Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3. Verteilung der insgesamt untersuchten Rinder (N= 2.891) auf die unterschiedlichen betäubenden Personen (1-14) in den beteiligten Schlachtbetrieben (A-E).

Schlacht- betrieb	betäubende Person	Anzahl insgesamt betäubter Rinder	Anzahl insgesamt betäubter Rinder in %
A	1	541	18,7 %
A	13	209	7,2 %
B	2	98	3,4 %
B	3	203	7,0 %
B	10	207	7,2 %
C	4	249	8,6 %
C	8	153	5,3 %
C	9	251	8,7 %
D	5	17	0,6 %
D	6	401	13,9 %
D	11	195	6,7 %
D	12	2	0,1 %
E	7	199	6,9 %
E	14	166	5,7 %
Gesamtergebnis		2.891	100,0 %

Abbildung 10 zeigt die Verteilung der Produktionsgruppen auf die unterschiedlichen betäubenden Personen. In den meisten Fällen ist der Anteil von Bullen im Verhältnis zur Gesamtuntersuchungsgruppe am höchsten. Lediglich bei den betäubenden Personen „7“, „13“ und „14“ überwiegt der Anteil weiblich betäubter Tiere im Verhältnis.

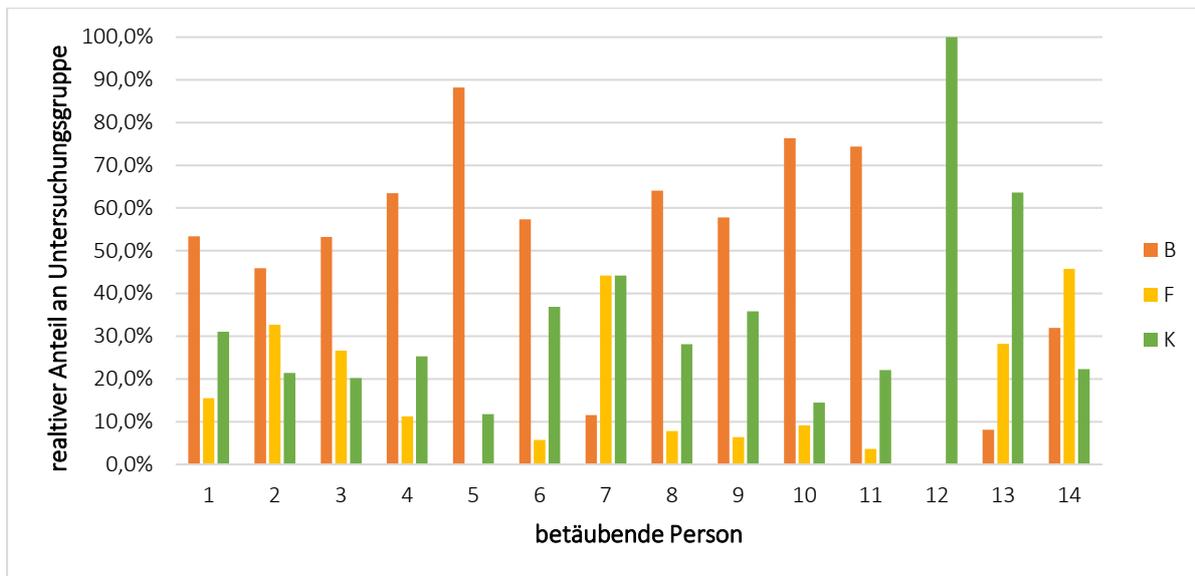


Abbildung 10. Verteilung der betäubten Rinder, differenziert nach Produktionsgruppe (B = Bulle, F= Färsen, K= Kuh) auf alle betäubenden Personen (1-14).

Beim Vergleich des Summen Scores zwischen den betäubenden Personen (Abbildung 11) zeigt sich teilweise eine Variation sowohl der Mittelwerte als auch der Breite der Interquartilsbereiche. Die betäubenden Personen mit den Nummern "2" (Betrieb B) und "14" (Betrieb E) wiesen besonders hohe durchschnittliche Summen Scores auf (6,4 und 7,1). Im statistischen Modell (ANOVA) ergab sich jedoch kein signifikanter Einfluss der betäubenden Person auf den Summen Score.

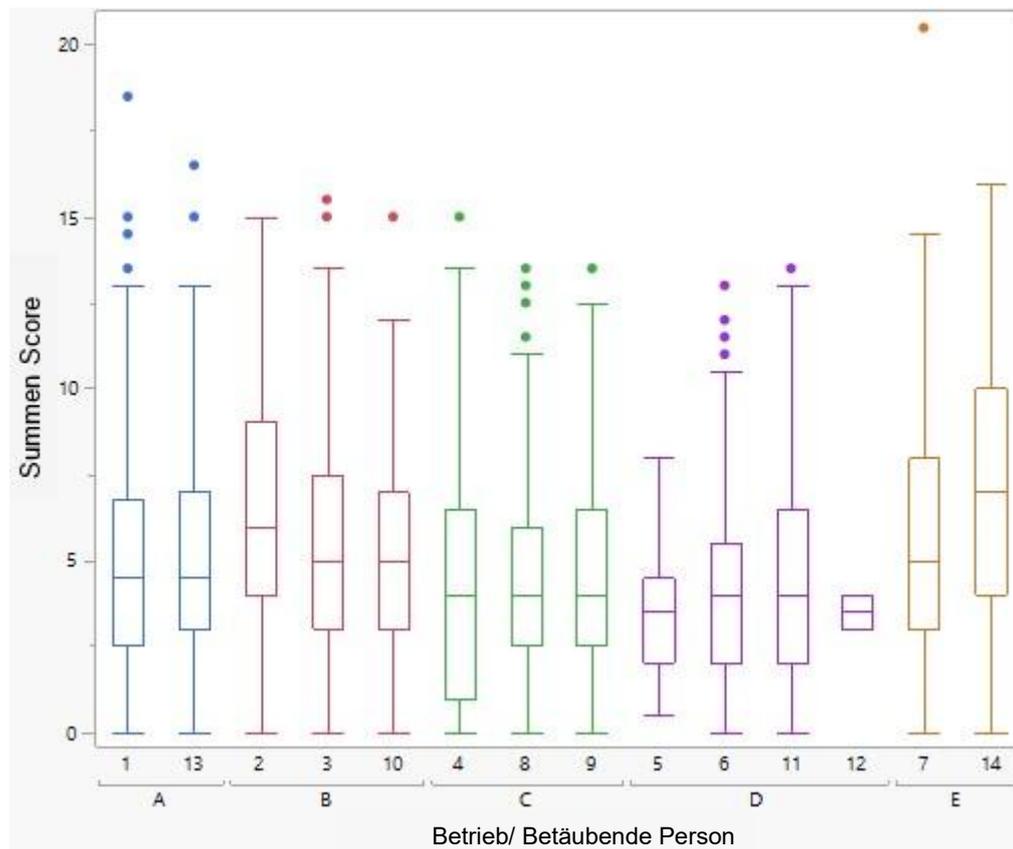


Abbildung 11. Lagemaße zum Summen Score der jeweiligen Untersuchungsgruppen differenziert nach betäubender Person (1-14) und Betrieb (A-E). Der Summen Score ergibt sich aus den Scores der acht Prozessintervalle (Auswurf bis 4. Minute der Entblutung), die jeweils die Gesamtsumme der Scorewerte aller beobachteten Bewegungen in diesem Intervall darstellen. Jeder Bewegung wurde entsprechend ihrer Intensität ein Score zwischen 0,5 und 3 zugeordnet.

5.1.1.3 Saison

Der mögliche Einfluss der Jahreszeit (Saison) wurde ebenfalls im statistischen Modell berücksichtigt. Hierfür wurde eine meteorologische Einteilung verwendet.

Die meisten Rinder wurden in den Untersuchungszeiträumen Herbst (n= 817) und Winter geschlachtet (n= 810). Am wenigsten Rinder wurden in der Saison „Frühling“ geschlachtet (n= 572). Die Verteilung der geschlachteten Rinder auf die Jahreszeiten nach Produktionsgruppe ist der Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4. Verteilung der untersuchten Rinder auf die saisonalen³ Untersuchungszeiträume, differenziert nach Produktionsgruppe.

Saison (N= 2.891)	Produktionsgruppe		
	Bulle	Färse	Kuh
Frühjahr ¹ (n= 572)	37,6 %	24,8 %	37,6 %
Sommer ¹ (n= 692)	58,4 %	17,3 %	24,3 %
Herbst ¹ (n= 817)	46,0 %	20,0 %	34,0 %
Winter ¹ (n= 810)	60,4 %	9,0 %	30,6 %
Gesamtergebnis	51,3 %	17,2 %	31,4 %

¹ meteorologische Jahreszeiten; Frühling: 1. März bis 31. Mai; Sommer: 1. Juni–31. August; Herbst: 1. September–30. November; Winter: 1. Dezember–28./ 29. Februar

Der durchschnittliche Summen Score war im Frühjahr mit 5,5 am höchsten, wohingegen er im Herbst den niedrigsten Wert von 4,6 aufwies. Im statistischen Modell (ANOVA) ergab sich kein signifikanter Einfluss der Jahreszeit auf das Auftreten von Bewegungen.

5.1.2 Einfluss tierbezogener Parameter auf die Bewegungen

Die Ergebnisse des Einflusses tierbezogener Parameter wie Rasse, Produktionsgruppe und Klassifizierung sind dem Abschnitt „Publizierte Studienergebnisse“ zu entnehmen. Im Folgenden werden die Ergebnisse zu Alter und Behornung dargestellt.

5.1.2.1 Alter

Aufgrund von prozesstechnischen Besonderheiten bestimmter Betriebe konnte bei 684 Rindern von insgesamt 2.911 untersuchten Tieren kein Alter erhoben werden. Das Durchschnittsalter der übrigen untersuchten Rinder, betrug 3,0 Jahre (Minimum 1,0, Maximum 17,2 Jahre). Die Mehrheit der Rinder wies ein Alter zwischen 1,5 und 2,0 Jahren auf.

Die statistische Analyse ergab keinen signifikanten Einfluss des Alters auf den Summen Score.

³ Frühling: 1. März bis 31. Mai; Sommer: 1. Juni–31. August; Herbst: 1. September–30. November; Winter: 1. Dezember–28./ 29. Februar

5.1.2.2 Behornung

Der überwiegende Anteil der Rinder in der Untersuchungsgruppe war hornlos oder enthornt. Lediglich bei 18,2 % (n= 529) der untersuchten Tiere konnten deutlich sichtbare Hornansätze oder ausgeprägte Hörner identifiziert werden. Bei Bullen und Färsen (22,8 %; 18,3 %) war der Anteil behornter Tiere vergleichsweise höher als bei Kühen (10,5 %).

Der Summen Score war im Mittel bei hornlosen Tieren etwas niedriger (4,8), als bei behornten Rindern (5,2) (Abbildung 12). In der ANOVA zeigte sich der Einfluss der Behornung jedoch nicht signifikant.

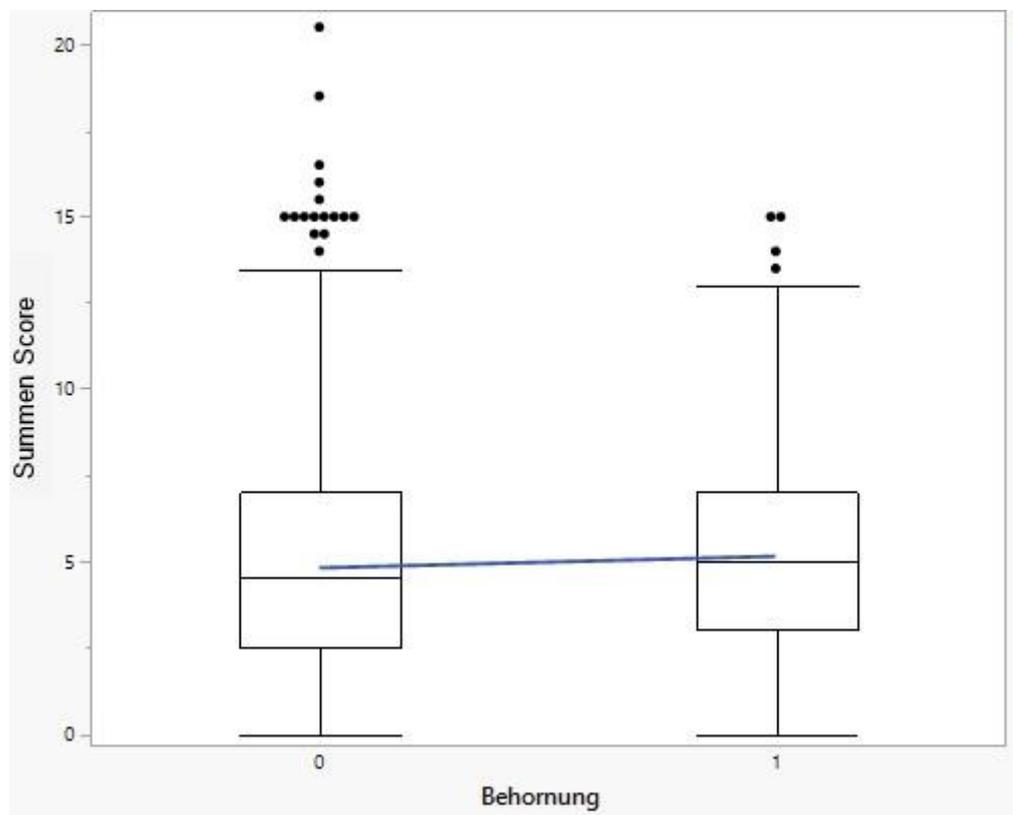


Abbildung 12. Lagemaße des Summen Scores von hornlosen Rindern (0) links und behornten Rindern (1) rechts. Der Summen Score ergibt sich aus den Scores der acht Prozessintervalle (Auswurf bis 4. Minute der Entblutung), die jeweils die Gesamtsumme der Scorewerte aller beobachteten Bewegungen in diesem Intervall darstellen. Jeder Bewegung wurde entsprechend ihrer Intensität ein Score zwischen 0,5 und 3 zugeordnet.

5.2 Überprüfung des Schussansatzes

Die Ergebnisse der Positions- und Winkelbestimmungen des Schusses am Ende der Entblutung werden im Folgenden für alle ursprünglich untersuchten 2.911 Tiere beschrieben.

5.2.1 Positionsabweichungen

Bei 90,5 % (n= 2.633) der untersuchten Tiere erfolgte der Betäubungsschuss an einer Position im Radius von unter 2 cm vom optimalen Ansatz. 7,5 % (n= 217) der Schüsse wichen ≥ 2 cm und < 3 cm vom optimalen Ansatz ab, 2,0 % (n= 61) der Schüsse lagen ≥ 3 cm vom optimalen Ansatz entfernt. Die höchste gemessene Schussabweichung lag bei 8 cm (n= 1).

Bei dem überwiegenden Anteil (83,5 %) der Positionsabweichungen war das Schussloch nach rostral hin verschoben (5, 6, 7). Die Verteilung der Schussabweichungen ist in Abbildung 13 dargestellt.

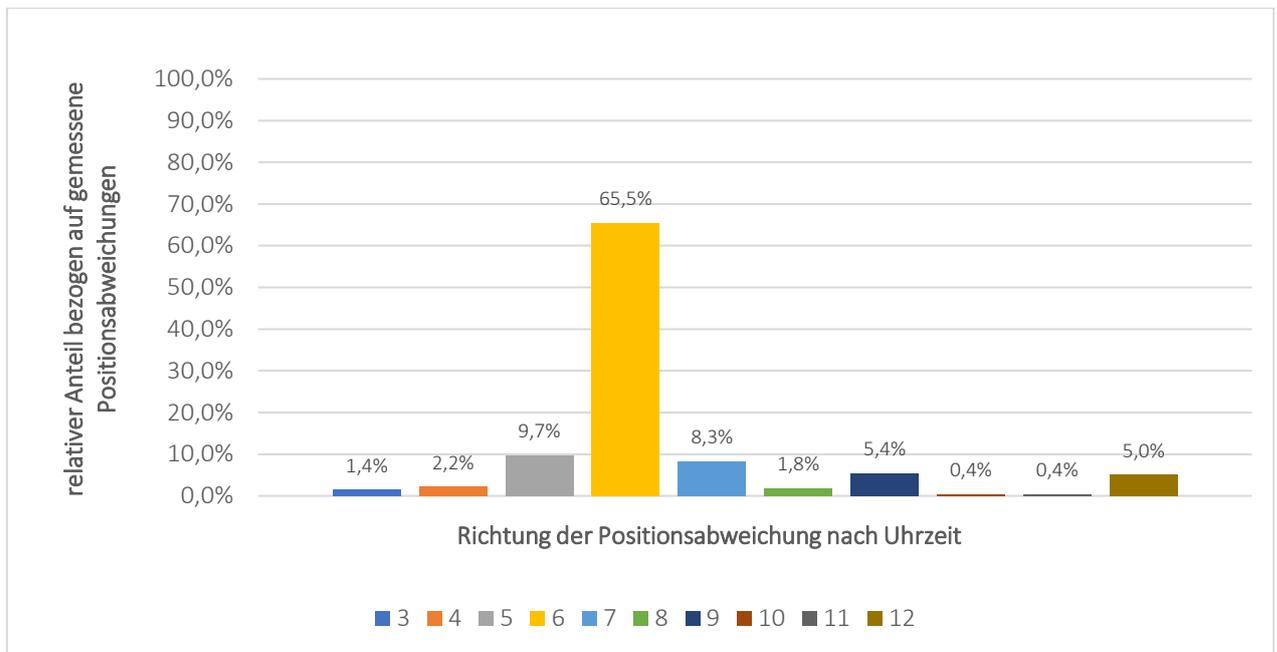


Abbildung 13. Verteilung des Anteils der verschiedenen Positionsabweichungen (in cm) vom optimalen Schussansatz (1 cm über einem Kreuzungspunkt zweier gedachter Linien zwischen Augenmitte und Mitte des gegenüberliegenden Hornansatzes) (n= 278) in der gesamten Untersuchungsgruppe (N= 2.911) auf die verschiedenen Richtungen (aus der Perspektive des Rindes: 2, 3, 4 Uhr \triangleq Abweichung nach links; 5, 6, 7 Uhr \triangleq Abweichung nach rostral; 8, 9, 10 Uhr \triangleq Abweichung nach rechts; 11, 12, 1 Uhr \triangleq Abweichung nach caudal).

Die wenigsten Abweichungen wurden bei Betrieb C (1,2 %) und die meisten bei Betrieb E (25,5 %) verzeichnet.

Beim Vergleich des Anteils an Tieren mit Abweichungen der Schussposition zwischen den Produktionsgruppen ist erkennbar, dass der Anteil an Schussabweichungen bei Kühen am niedrigsten war (Tabelle 5).

Tabelle 5. Verteilung des Anteils der verschiedenen Positionsabweichungen (in cm) vom optimalen Schussansatz (1 cm über einem Kreuzungspunkt zweier gedachter Linien zwischen Augenmitte und Mitte des gegenüberliegenden Hornansatzes) innerhalb der verschiedenen Produktionsgruppen (Bullen, Färsen, Kühen).

Positionsabweichungen in cm (N= 2.911)	Produktionsgruppe			Gesamt
	Bulle	Färse	Kuh	
< 2 (n= 2.633)	88,0 %	88,4 %	95,6 %	90,5 %
\geq 2 (n= 218)	9,1 %	9,6 %	3,6 %	7,5 %
\geq 3 (n= 47)	2,3 %	1,6 %	0,5 %	1,6 %
\geq 4 (n= 11)	0,6 %	0,2 %	0,1 %	0,4 %
\geq 5 (n= 1)	0,0 %	0,0 %	0,1 %	0,0 %
8 (n= 1)	0,0 %	0,2 %	0,0 %	0,0 %

Die Schussergebnisse der einzelnen betäubenden Personen hinsichtlich Positionsabweichungen variierten teilweise stark (Tabelle 6).

Tabelle 6. Verteilung des Anteils der verschiedenen Positionsabweichungen vom optimalen Schussansatz (1 cm über einem Kreuzungspunkt zweier gedachter Linien zwischen Augenmitte und Mitte des gegenüberliegenden Hornansatzes) (in cm) auf die verschiedenen betäubenden Personen.

Betrieb	Betäubenden Personen	Positionsabweichungen vom optimalen Ansatz in cm			
		< 2	≥ 2	≥ 3	≥ 4
A	1 (n= 545)	94,0 %	5,0 %	1,0 %	0,0 %
A	13 (n= 210)	92,0 %	6,0 %	0,0 %	1,0 %
B	2 (n= 98)	99,0 %	1,0 %	0,0 %	0,0 %
B	3 (n= 203)	98,0 %	1,0 %	1,0 %	0,0 %
B	10 (n= 207)	61,0 %	30,0 %	8,0 %	0,0 %
C	4 (n= 249)	100,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
C	8 (n= 153)	97,0 %	3,0 %	0,0 %	0,0 %
C	9 (n= 252)	99,0 %	1,0 %	0,0 %	0,0 %
D	5 (n= 17)	100,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
D	6 (n= 403)	95,0 %	4,0 %	0,0 %	0,0 %
D	11 (n= 199)	93,0 %	7,0 %	0,0 %	0,0 %
D	12 (n= 3)	100,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
E	7 (n= 200)	86,0 %	14,0 %	0,0 %	0,0 %
E	14 (n= 172)	61,0 %	26,0 %	10,0 %	3,0 %
Gesamt	N= 2.911	91,0%	7,0 %	2,0 %	0,0 %

In der nachfolgenden Grafik (Abbildung 14) wird die Verteilung der Rinder (N= 2.911) mit guter (n= 2.892), fraglicher (n= 9) und nicht ausreichender Betäubungseffektivität (n= 10) in Abhängigkeit von der Distanz zum optimalen Schusspunkt veranschaulicht. Es zeigte sich, dass die meisten Rinder (n= 44) mit Abweichungen von bis zu 3 cm vom empfohlenen Ansatz dennoch effektiv betäubt wurden. Erst bei größeren Abweichungen von über 4 cm wurden bei allen Rindern Anzeichen einer fraglichen oder nicht ausreichenden Betäubungseffektivität beobachtet.

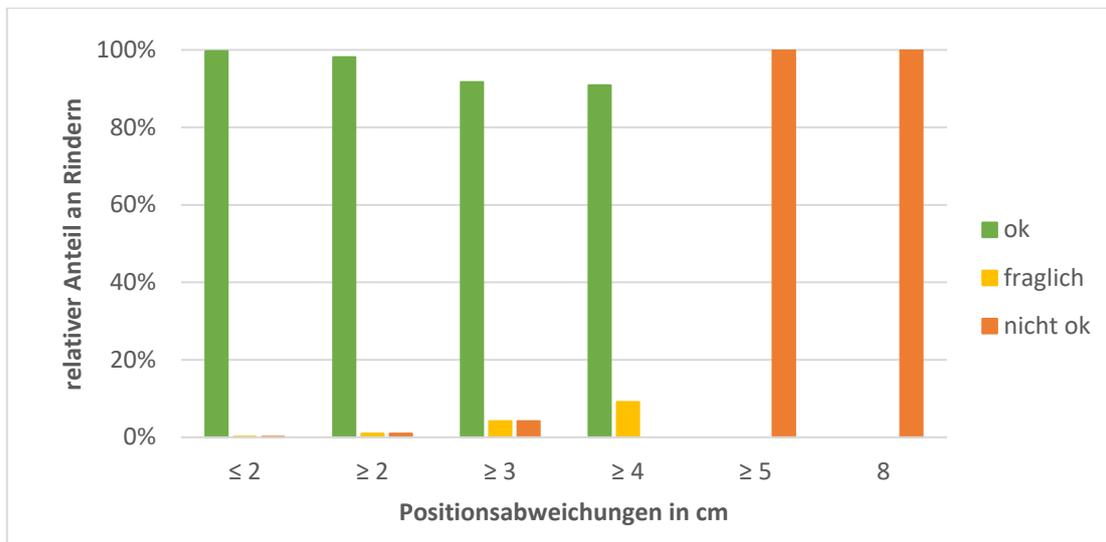


Abbildung 14. Relativer Anteil an Rindern mit guter (ok), fraglicher (fraglich) und nicht ausreichender (nicht ok) Betäubungseffektivität (N= 2.911) differenziert nach Positionsabweichung in cm vom optimalen Schussansatz (1 cm über einem Kreuzungspunkt zweier gedachter Linien zwischen Augenmitte und Mitte des gegenüberliegenden Hornansatzes).

5.2.2 Winkelabweichungen

Bei der Überprüfung des Schussansatzes wurden bei 12,8 % (n= 373) der Rinder Winkelabweichungen von mindestens 10 ° von der Senkrechten festgestellt. Bei 9,7 % (n= 282) wich der Schusswinkel um genau 10 ° ab. In 1,8 % der Fälle wurden Abweichungen von 15 ° gemessen und bei weiteren 1,2 % betrug die Winkelabweichung 20 °. Nur in drei Fällen wurden Abweichungen vom senkrechten Schusswinkel über 20 ° erfasst. Die größte gemessene Winkelabweichung lag bei 40 °.

Rostrale Abweichungen (Schussapparat wird zur Nase hin gekippt) wurden am häufigsten gemessen (43,4 %). Danach folgten Winkelabweichungen nach links (29,2 %) und rechts (16,1 %). Nur in wenigen Fällen (2,9 %) wurde der Apparat während des Schusses nach caudal abgewinkelt. 8,4 % betrafen Abweichung in rostral-linke, rostral-rechte oder caudal-rechte Richtung.

Beim Vergleich der Betriebe in Bezug auf den Prozentsatz der Rinder mit Winkelabweichungen (Tabelle 7) wies Betrieb „C“ den höchsten Anteil an Rindern ohne Winkelabweichungen auf (93,4 %), während dieser Anteil bei Betrieb „E“ am niedrigsten war (78,0 %).

Tabelle 7. Verteilung der gemessenen Abweichungsrichtung vom optimalen Einschusswinkel (senkrecht zu Stirn) bei den untersuchten Rindern innerhalb der verschiedenen Betriebe (A-E).

Abweichungsrichtung *	Betriebe					Gesamt
	A	B	C	D	E	
caudal	0,0 %	0,0 %	0,3 %	0,2 %	2,2 %	0,4 %
caudal rechts	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,3 %	0,0 %
links	5,2 %	3,0 %	1,5 %	3,1 %	7,0 %	3,7 %
rechts	1,9 %	1,8 %	1,5 %	0,2 %	7,0 %	2,1 %
rostral	11,7 %	3,3 %	3,1 %	4,0 %	3,2 %	5,6 %
rostral links	0,8 %	0,0 %	0,0 %	1,4 %	1,1 %	0,7 %
rostral rechts	0,0 %	0,6 %	0,2 %	0,3 %	1,3 %	0,4 %
Ohne Abweichung	80,5 %	91,3 %	93,4 %	90,8 %	78,0 %	87,2 %

* des Schussapparates beim Ansatz

Zwischen den Produktionsgruppen zeigten sich nur geringfügige Unterschiede hinsichtlich des Anteils an Tieren mit Winkelabweichungen (siehe Abbildung 15).

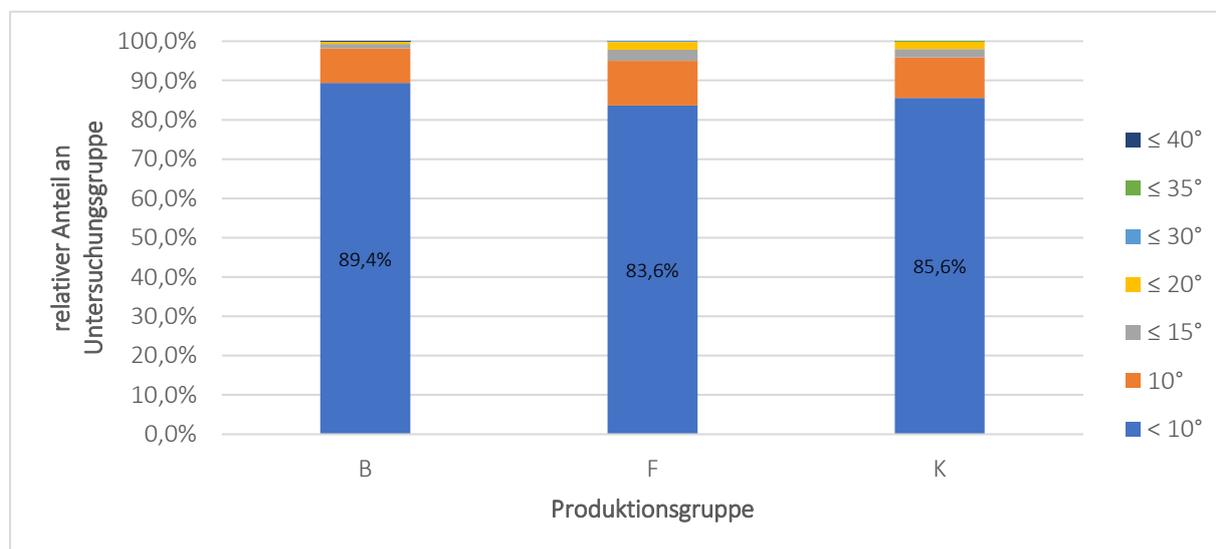


Abbildung 15. Verteilung des Anteils der gemessenen Abweichungen vom optimalen Einschusswinkel (senkrecht zur Stirn) innerhalb der drei Produktionsgruppen (B= Bulle, F= Färsen, K= Kuh).

Die Schussergebnisse der verschiedenen betäubenden Personen hinsichtlich Winkelabweichungen variierten deutlich (Tabelle 8).

Tabelle 8. Ausmaß der Winkelabweichungen (in °) des Betäubungsschusses differenziert nach Betrieb (A-E) und betäubender Person (1-14)

Betrieb	betäubende Person	Winkelabweichung vom senkrechten Ansatz		
		< 10 °	≥ 10 °	≥ 20 °
A	1 (n= 545)	74,0 %	22,0 %	4,0 %
A	13 (n= 210)	98,0 %	2,0 %	0,0 %
B	2 (n= 98)	78,0 %	15,0 %	7,0 %
B	3 (n= 203)	92,0 %	8,0 %	0,0 %
B	10 (n= 207)	98,0 %	2,0 %	0,0 %
C	4 (n= 249)	96,0 %	3,0 %	1,0 %
C	8 (n= 153)	87,0 %	13,0 %	0,0 %
C	9 (n= 252)	95,0 %	5,0 %	0,0 %
D	5 (n= 17)	82,0 %	18,0 %	0,0 %
D	6 (n= 403)	88,0 %	12,0 %	0,0 %
D	11 (n= 199)	97,0 %	3,0 %	0,0 %
D	12 (n= 3)	100,0 %	0,0 %	0,0 %
E	7 (n= 200)	69,0 %	29,0 %	2,0 %
E	14 (n= 172)	89,0 %	8,0 %	2,0 %
Gesamt	N= 2.911	87,0 %	11,0 %	1,0 %

Abbildung 16 zeigt die Verteilung der Rinder mit Winkelabweichungen beim Betäubungsschuss in Abhängigkeit von der Beurteilung der Betäubungseffektivität (gut, fraglich, nicht ausreichend). Der Anteil an fraglichen und nicht ausreichend betäubten Tieren (nicht ok) nimmt bei Rindern mit steigender Winkelabweichungen zu.

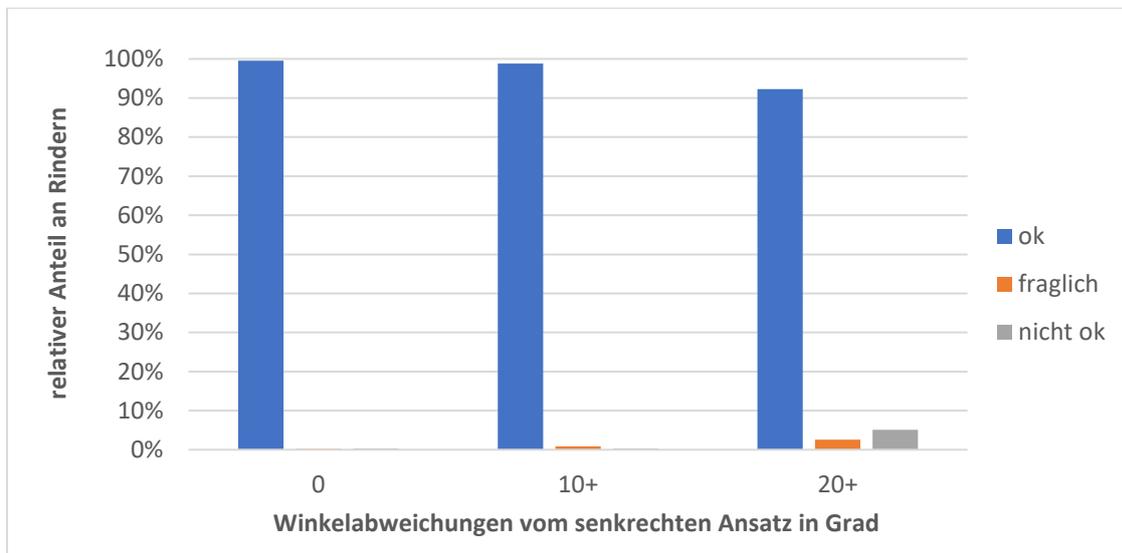


Abbildung 16. relativer Anteil an Rindern mit Winkelabweichungen innerhalb der Tiere mit guter (ok), fraglicher (fraglich) und nicht ausreichender (nicht ok) Betäubungseffektivität.

5.3 Überprüfung und Messung gerätebezogener Schlüsselparameter

Die Überprüfung der Schlüsselparameter wurde für die Mehrheit der Bolzenschussgeräte mittels der beiden zuvor beschriebenen Methoden durchgeführt (Stun Tester-Methode und Steckschaum-Methode; Hochgeschwindigkeitskamera). Einzelne Geräte konnten jedoch mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen ausschließlich durch eine Methode überprüft werden, da sie zum Untersuchungszeitpunkt nicht verfügbar waren.

Die Tabelle 9 zeigt eine Übersicht über die getesteten Geräte und die jeweils verwendete Messmethode.

Tabelle 9. Übersicht der untersuchten Gerätetypen und verwendeten Ladungsstärken bzw. dem eingestellten Luftdruck für die jeweils durchgeführte Prüfmethode.

Firma	Gerätetyp	Ladung in mg, Druck in bar / Farbe	Methode 1: Stun Tester & Blumensteckschaum	Methode 2: Hochgeschwindig- keitskamera (PTB)
Schermer®	KS	315 mg/ blau	x	
		320 mg/ rot	x	x
	KR	315 mg/ blau	x	x
		320 mg/ rot	x	x
	KL	315 mg/ blau	x	x
		320 mg/ rot	x	x
Frontmatec	Cash® Auto 22.	260 mg/ rot	x	x
		292 mg/ schwarz	x	x
	Cash® Auto 25.	259 mg/ schwarz	x	x
		292 mg/ grün		x
	Termet	SS3000 Typ 917	250 mg/ rot	x
290 mg/ schwarz			x	x
Turbocut	Bullen-Blitz Blitz Kerner	490 mg/ rot	x	x
		490 mg/ rot	x	x
Dick	VSG-9LC	490 mg/ rot	x	x
Jarvis®	PAS Type C 22R	260 mg/ rot		x
		292 mg/ schwarz		x
	PAS Type C 25R	292 mg/ rot		x
Jarvis® ¹	USSS-21	390 mg/ schwarz		x
		12 bar	x	x
		13 bar	x	x
Jarvis® ²	USSS-21	14 bar	x	x
		13 bar	x	
		14 bar	x	
EFA®	VB 315	15 bar	x	
		13 bar	x	
		14 bar	x	
		15 bar	x	

¹ USSS-21 Variante mit 14,5 mm Bolzendurchmesser, und einer Bolzenschaftlänge (Bolzengesamtlänge exkl. Kolben) von 252 mm

² USSS-21 Variante mit 12 mm Bolzendurchmesser, und einer Bolzenschaftlänge von 227 mm

5.3.1 Erfassung der Austrittslänge

Bei der Überprüfung der Austrittslänge mittels Blumensteckschaum betragen die Differenzen zwischen den einzelnen Messwerten für eine geprüfte Gerätevariante maximal 11,3 mm. Im Mittel unterschieden sich die einzelnen Werte um 1,4 mm voneinander bei jeweils 3 Messungen.

Im Falle der Messung mittels Hochgeschwindigkeitskamera wichen die Werte der i.d.R. 5 Einzelmessungen je Gerätevariation im Mittel um 2,6 mm voneinander ab.

Bei keiner der beiden Methoden nahmen die Werte im Verlauf der Testmessung konstant ab- oder zu (siehe Abbildung 17).

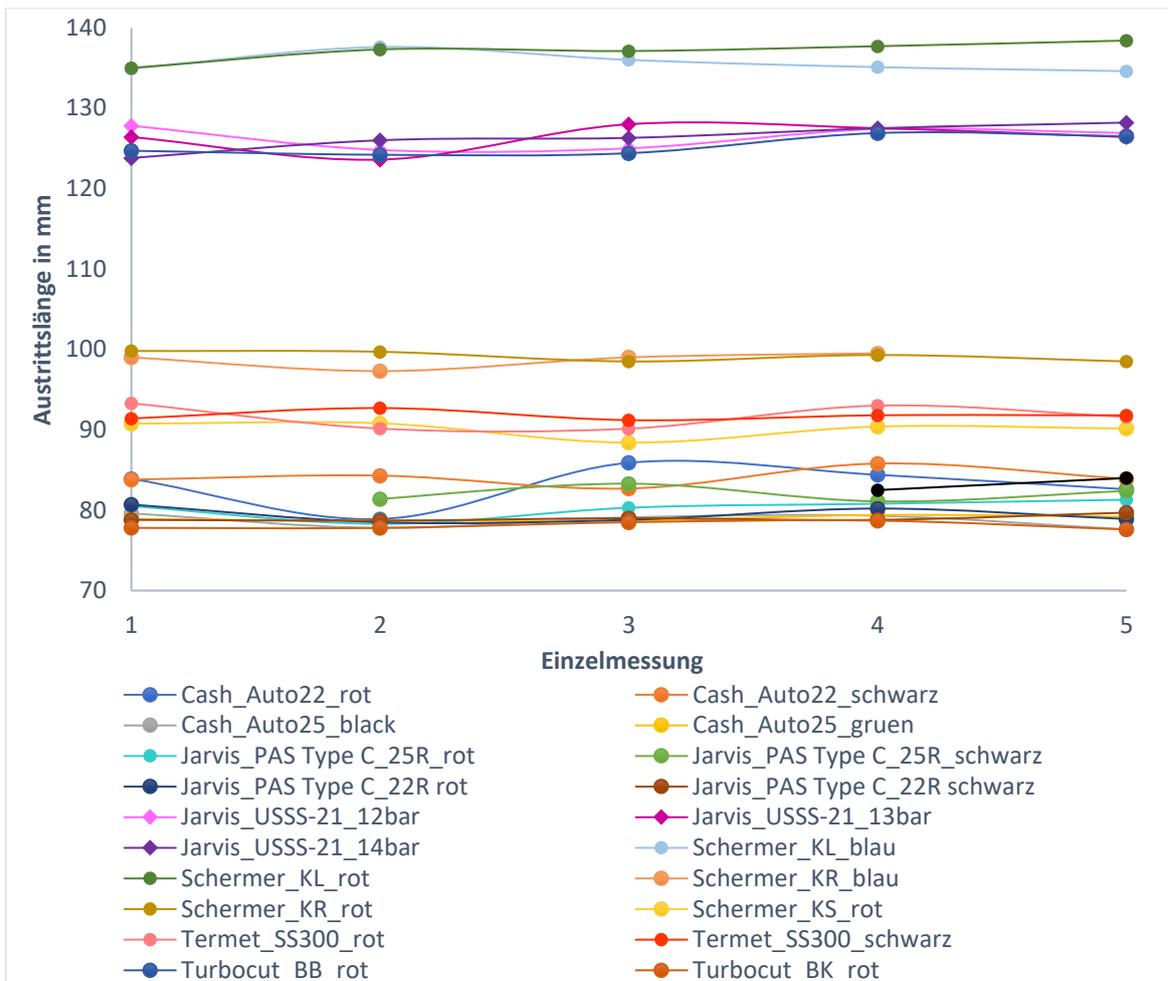


Abbildung 17. Austrittslänge des Bolzens (in mm) der verschiedenen Gerätetypen und -variationen (verwendete Ladungsstärke bzw. eingestellter Druck) für die Einzelmessungen (1 bis 5) mittels Hochgeschwindigkeitskamera

Die Austrittslänge des Bolzens wurde für den überwiegenden Teil der Schussgeräte und -varianten mit beiden Messmethoden geprüft. Die gemittelten Ergebnisse beider Methoden wurden miteinander verglichen (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10. Vergleich der Mittelwerte (3 bis 5 Messungen je Gerätevariation) für die Bolzenaustrittslänge der untersuchten Gerätetypen und -variationen beider Messmethoden (Methode 1: Blumensteckschaum, Methode 2: Hochgeschwindigkeitskamera) (nicht repräsentative Messung).

Firma	Geräte-Typ	Ladung in mg, Druck in bar	Ø Austrittslänge Steckschaum-Methode in mm	Ø Austrittslänge Hochgeschwindigkeitskamera in mm	Differenz in mm
Schermer®	KS	315 mg/ blau	78,5	n.g.	n.g.
		320 mg/ rot	80,8	87,8	7,0
	KR	315 mg/ blau	86,2	97,0	10,8
		320 mg/ rot	87,9	97,7	9,8
	KL	315 mg/ blau	117,8	134,1	16,3
		320 mg/ rot	120,9	135,3	14,4
Frontmatec	Cash® Auto .22	260 mg/ rot	75,2	82,0	6,8
		292 mg/ schwarz	76,3	80,1	3,8
	Cash® Auto .25	259 mg/ schwarz	70,3	77,3	7,0
		292 mg/ grün	n.g.	77,3	
Termet	SS3000 Typ 917	250 mg/ rot	80,9	89,9	9,0
		290 mg/ schwarz	83,8	90,5	6,7
Turbocut	Bullen-Blitz	490 mg/ rot	97,9	124,6	26,7
	Blitz Kerner	490 mg/ rot	63,6	77,0	13,4
Dick	VSG-9LC	490 mg/ rot	71,2	80,9	9,7
Jarvis®	PAS Type C .22R	260 mg/ rot	n.g.	77,6	n.g.
		292 mg/ schwarz	n.g.	78,0	n.g.
	PAS Type C .25R	292 mg/ rot	n.g.	78,6	n.g.
		390 mg/ schwarz	n.g.	79,9	n.g.
Jarvis® ¹	USSS-21	12 bar	n.g.	125,2	n.g.
		13 bar	112,0	124,7	12,7
		14 bar	n.g.	124,3	n.g.
Jarvis® ²	USSS-21	13 bar	88,0	n.g.	n.g.
		14 bar	n.g.	n.g.	n.g.
		15 bar	n.g.	n.g.	n.g.
EFA®	VB-315	13 bar	119,0	n.g.	n.g.
		14 bar	n.g.	n.g.	n.g.
		15 bar	n.g.	n.g.	n.g.

¹ USSS-21 Variante mit 14,5 mm Bolzendurchmesser, und einer Bolzenschaftlänge (Bolzengesamtlänge exkl. Kolben) von 252 mm

² USSS-21 Variante mit 12 mm Bolzendurchmesser und einer Bolzenschaftlänge von 227 mm

Der höchste Wert für die Austrittslänge wurde für das Gerät Typ KL von der Firma Schermer® (320 mg) gemessen. Bei Methode 1 betrug die durchschnittliche Austrittslänge 120,9 mm, bei Methode 2 135,3 mm. Das Bolzenschussgerät mit der geringsten Austrittslänge war der Typ Blitz-Kerner von der Firma Turbocut. Hier betrug die Austrittslänge im Durchschnitt lediglich 63,6 mm bzw. 77,0 mm.

Es fällt auf, dass die mittels Hochgeschwindigkeitskamera ermittelten Werte immer etwas höher lagen als die mittels Blumensteckschaum gemessenen Werte. Im Durchschnitt lag die Differenz zwischen beiden Ergebnissen bei 11,0 mm (Minimum 3,8 mm, Maximum 26,7 mm).

In den meisten Fällen war eine Zunahme der Austrittslänge bei zunehmender Antriebsenergie gleicher Gerätetypen erkennbar. Lediglich bei den Gerätetypen Cash® Magnum Auto .25 und Jarvis® USSS-21 wurde keine Zunahme beobachtet.

Bei der Analyse der Videoaufnahmen, aufgezeichnet durch die Hochgeschwindigkeitskamera der PTB, zeigte sich, dass der Bolzen sich während des Schussvorgangs nicht nur einmal aus der Bolzenmündung herausbewegt und sich nach Erreichen der maximalen Austrittslänge wieder zurückzieht. Vielmehr tritt der Bolzen zwei- bis dreimal aus der Bolzenmündung aus und wird jeweils wieder zurückgezogen.

Bei bestimmten Geräten wurde während des Schusses eine erhebliche Menge an Schmauch ausgestoßen. Dies führte in Einzelfällen dazu, dass das aufgenommene Video unbrauchbar wurde. Besonders deutlich trat dieses Phänomen bei dem Gerätetyp VSG-9LC der Firma Dick auf.

5.3.2 Erfassung der Geschwindigkeit

Bei der Auswertung der Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera zeigte sich, dass die maximale Austrittsgeschwindigkeit des Bolzens bereits nach wenigen Millimetern erreicht wurde und sich danach bis kurz vor Erreichen der maximalen Austrittslänge nicht wesentlich änderte. Abhängig vom Gerätetyp lag der Abstand zur Mündung, ab dem keine Beschleunigung mehr gemessen werden konnte, in etwa bei 15 mm. Die Tabelle 11 enthält die gemittelten Messergebnisse zur Bolzengeschwindigkeit der untersuchten Geräte bei unterschiedlichen Ladungsmengen und anliegendem Druck.

Tabelle 11. Vergleich der Mittelwerte (3 bis 5 Messungen je Gerätevariation) der Bolzengeschwindigkeit der untersuchten Gerätetypen und -variationen beider Messmethoden (Methode 1: Stun Tester-Methode, Methode 2: Hochgeschwindigkeitskamera) (nicht repräsentative Messung).

Firma	Geräte- Typ	Ladung in mg, Druck in bar	Ø Bolzen- geschwindigkeit Methode 1 in m/s	Ø Bolzen- geschwindigkeit Methode 2 in m/s	Differenz in m/s	
Schermer®	KS	315 mg/ blau	50,3	n.g.	n.g.	
		320 mg/ rot	52,6	55,1	2,5	
	KR	315 mg/ blau	56,1	56,4	0,2	
		320 mg/ rot	58,3	58,6	0,3	
	KL	315 mg/ blau	51,5	53,3	1,8	
		320 mg/ rot	58,4	58,1	-0,3	
Frontmatec	Cash® Auto .22	260 mg/ rot	50,7	54,7	4,0	
		292 mg/ schwarz	58,9	58,9	-0,1	
	Cash® Auto .25	259 mg/ schwarz	60,3	59,9	-0,4	
		292 mg/ grün	64,2	60,9	-3,4	
	Termet	SS3000 Typ 917	250 mg/ rot	52,0	56,8	4,8
			290 mg/ schwarz	59,5	59,6	0,0
Turbocut	Bullen-Blitz	490 mg/ rot	43,7	45,8	2,1	
	Blitz Kerner	490 mg/ rot	49,8	50,0	0,2	
Dick	VSG-9LC	490 mg/ rot	43,0	47,4	4,4	
Jarvis®	PAS Type C .22R	260 mg/ rot	55,4	54,3	-1,2	
		292 mg/ schwarz	57,0	55,2	-1,8	
	PAS Type C .25R	292 mg/ rot	59,3	59,3	0,0	
		390 mg/ schwarz	64,7	62,9	-1,7	
Jarvis® ¹	USSS-21	12 bar	31,3	29,9	-1,4	
		13 bar	31,0	31,9	0,9	
		14 bar	33,6	35,2	1,5	
Jarvis® ²	USSS-21	13 bar	41,6	n.g.	n.g.	
		14 bar	43,0	n.g.	n.g.	
		15 bar	43,2	n.g.	n.g.	
EFA®	VB-315	13 bar	38,5	n.g.	n.g.	
		14 bar	41,6	n.g.	n.g.	
		15 bar	42,6	n.g.	n.g.	

¹ USSS-21 Variante mit 14,5 mm Bolzendurchmesser, und einer Bolzenschaftlänge (Bolzengesamtlänge exkl. Kolben) von 252 mm

² USSS-21 Variante mit 12 mm Bolzendurchmesser und einer Bolzenschaftlänge von 227 mm

Sowohl mittels Stun Tester als auch mittels Hochgeschwindigkeitskamera wurde die höchste durchschnittliche Bolzengeschwindigkeit bei dem Gerät Typ PAS-Type C .25R der Firma Jarvis® unter Verwendung roter Kartuschen (390 mg) gemessen (64,7 m/s; 62,9 m/s).

Die niedrigste durchschnittliche Geschwindigkeit bei Anwendung beider Messmethoden wurde bei dem pneumatischen Gerätetyp USSS-21 (14,5 mm Bolzendurchmesser, 252 mm Schaftlänge) der Firma Jarvis® mit einem Druck von 12 bar ermittelt (31,3 m/s; 29,9 m/s). Mittels Stun Tester-Methode ergab sich unter den ladungsbetriebenen Geräten für den Gerätetyp VSG-9LC von der Firma Dick die geringste durchschnittliche Geschwindigkeit (43,0 m/s). Mittels Hochgeschwindigkeitskamera wurde bei ladungsbetriebenen Geräten die niedrigste durchschnittliche Geschwindigkeit bei dem Gerätetyp Blitz Kerner von der Firma Turbocut ermittelt (45,8 m/s). Im Vergleich zu den Messwerten der Austrittslänge fällt auf, dass die Werte beider Messmethoden sich zwar ähneln, aber keine der beiden Methoden zu konstant höheren oder niedrigeren Werten führt als die andere. Im Durchschnitt lag die Differenz zwischen beiden Ergebnissen bei 1,6 m/s (Minimum 0 m/s, Maximum 4,8 m/s).

Unterschiede in Bezug auf die Bolzengeschwindigkeit sind auf die jeweilige Funktionsart der Geräte zurückzuführen. Bei ladungsbetriebenen Geräten ist die Bolzengeschwindigkeit tendenziell höher als bei pneumatisch betriebenen Geräten. Eine Steigerung des Luftdrucks oder der Ladungsstärke bewirkt stets eine Zunahme der Geschwindigkeit des austretenden Bolzens.

Die durchschnittliche Differenz zwischen den mittels beider Methoden ermittelten Werten beträgt für alle Gerätevariationen ungefähr 1,6 m/s. Im Gegensatz zur Austrittslänge zeigt sich dabei keine einheitliche Richtung der Differenz zwischen den Methoden.

5.3.3 Berechnung der kinetischen Energie

Die kinetische Energie des Bolzens wurde aus der zuvor ermittelten Geschwindigkeit und der mittels Präzisionswaage gemessenen Masse des Bolzens für die jeweilige Gerätevariation berechnet. Die Ergebnisse sind in der nachstehenden Tabelle 12 aufgelistet.

Tabelle 12. Vergleich der Mittelwerte (3 bis 5 Messungen je Gerätevariation) der kinetischen Energie des Bolzens der untersuchten Gerätetypen und -variationen beider Messmethoden (Methode 1: Stun Tester-Methode, Methode 2: Hochgeschwindigkeitskamera) (nicht repräsentative Messung)

Firma	Geräte-Typ	Ladung in mg, Druck in bar	Masse Bolzen in kg	kinetische Energie - Methode 1 in Joule	kinetische Energie- Methode 2 in Joule	Differenz in Joule
Schermer®	KS	315 mg/ blau	0,242	306,3	n.g.	n.g.
	KS	320 mg/ rot	0,242	334,3	366,9	32,6
	KR	315 mg/ blau	0,229	360,9	363,9	3
	KR	320 mg/ rot	0,229	389,2	393,8	4,6
	KL	315 mg/ blau	0,254	336,4	360,8	24,4
	KL	320 mg/ rot	0,254	433,1	428,5	-4,6
Frontmatec	Cash® Auto .22	260 mg/ rot	0,235	302,3	351,7	49,4
	Cash® Auto .22	292 mg/ schwarz	0,235	408,2	407,3	-0,9
	Cash® Auto .25	259 mg/ schwarz	0,23	417,9	412,0	-5,9
	Cash® Auto .25	292 mg/ grün	0,23	474,0	425,9	-48,1
	Termet	SS3000 Typ 917	250 mg/ rot	0,242	326,7	390,1
	SS3000 Typ 917	290 mg/ schwarz	0,242	428,4	429,1	0,7
Turbocut	Bullen-Blitz	490 mg/ rot	0,232	221,3	242,8	21,5
	Blitz Kerner	490 mg/ rot	0,209	259,0	261,6	2,6
Dick	VSG-9LC	490 mg/ rot	0,201	186,1	225,8	39,7
Jarvis®	PAS Type C .22R	260 mg/ rot	0,233	357,8	343,2	-14,6
	PAS Type C .22R	292 mg/ schwarz	0,233	378,6	354,5	-24,1
	PAS Type C .25R	292 mg/ rot	0,233	409,5	407,6	-1,9
	PAS Type C .25R	390 mg/ schwarz	0,233	487,3	459,8	-27,5

Fortsetzung **Tabelle 12.**

Firma	Geräte-Typ	Ladung in mg, Druck in bar	Masse Bolzen in kg	kinetische Energie - Methode 1 in Joule	kinetische Energie- Methode 2 in Joule	Differenz in Joule
Jarvis® ¹	USSS-21	12 bar	0,634	310,6	284,1	-26,5
	USSS-21	13 bar	0,634	304,6	323,7	19,1
	USSS-21	14 bar	0,634	358,6	392,2	33,6
Jarvis® ²	USSS-21	13 bar	0,516	447,3	n.g.	
	USSS-21	14 bar	0,516	477,9	n.g.	
	USSS-21	15 bar	0,516	481,0	n.g.	
EFA®	VB-315	13 bar	0,564	418,0	n.g.	
	VB-315	14 bar	0,564	488,0	n.g.	
	VB-315	15 bar	0,564	510,6	n.g.	

¹USSS-21 Variante mit 14,5 mm Bolzendurchmesser, und einer Bolzenschaftlänge (Bolzengesamtlänge exkl. Kolben) von 252 mm

²USSS-21 Variante mit 12 mm Bolzendurchmesser und einer Bolzenschaftlänge von 227 mm

Die errechneten Werte für die kinetische Energie liegen für die untersuchten Gerätevariationen bei Methode 1 zwischen einem minimalen Wert von 186,1 J (Typ VSG-9LC, Dick) und einem maximalen Wert von 510,6 J (Typ VB-315, EFA, 15 bar).

Entsprechend der Ergebnisse für die Geschwindigkeit ist bei Verwendung stärkerer Ladungen oder höheren Drucks ebenso ein Anstieg der kinetischen Energie bei den Bolzenschussgeräten zu verzeichnen (Abbildung 18). Dementsprechend ist das Gerät mit der unter den untersuchten Gerätevariationen höchsten Geschwindigkeit (Typ PAS Type C .25R von Jarvis® mit schwarzer Ladung) auch das ladungsbetriebene Gerät mit der höchsten kinetischen Energie (487,3 J bzw. 459,8 J). Auffallend niedrige Werte ergaben sich für den Typ VSG-9LC der Firma Dick. Die ermittelte kinetische Energie betrug 186,1 J (Stun Tester) bzw. 225,8 J (Hochgeschwindigkeitskamera).

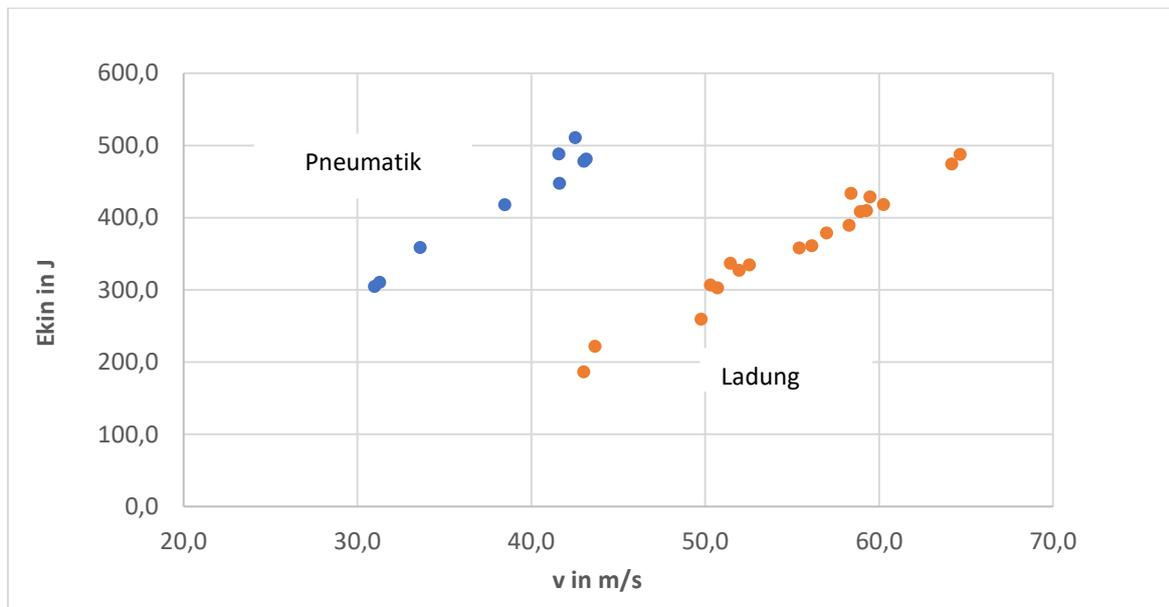


Abbildung 18. Verhältnis von kinetischer Energie zur Bolzengeschwindigkeit für die untersuchten Varianten von pneumatischen (blau) und ladungsbetriebenen (orange) Schussapparaten. Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte aus 5 Einzelmessungen je Gerätevariation.

Die beiden genannten Funktionsarten, Ladung und Pneumatik, unterschieden sich hinsichtlich des Bolzengewichts erheblich, Bolzen für die untersuchten ladungsbetriebenen Geräte wogen durchschnittlich 234 g, während das Bolzengewicht bei den pneumatischen Gerätevarianten mit mindestens 516 g mehr als das Doppelte betrug.

Vergleicht man die Ergebnisse der kinetischen Energie, die auf Grundlage der Stun Tester-Methode berechnet wurden, erreichen die pneumatischen Geräte teilweise höhere Werte als die ladungsbetriebenen Geräte. Infolge des höheren Bolzengewichts liegt die Energie für die untersuchten pneumatischen Gerätevariationen in einem vergleichbaren Bereich wie bei den ladungsbetriebenen. Dabei weichen die untersuchten ladungsbetriebenen Gerätevariationen der Firmen Dick und Turbocut nach unten ab und das Gerät Typ VB 315 der Fa. EFA nach oben (siehe Abbildung 18).

6 Erweiterte Diskussion

6.1 Überprüfung des Schussansatzes

Die Abweichungen der Schussposition und des Einschusswinkels sind einerseits als möglich Einflussfaktoren auf die Bewegungen von Bedeutung (Lücking et al. 2024) (Vgl. 4), andererseits sind sie das Resultat unterschiedlicher prozesstechnischer Faktoren und können Einfluss auf die resultierende Betäubungseffektivität haben. Als optimaler Ansatzpunkt gilt der Punkt 1 cm über dem Kreuzungspunkt zweier gedachter Linien zwischen Augenmitte und der kontralateralen Mitte des ggf., gedachten Hornansatzes (Kohlen 2011, TVT 2018, Gilliam et al. 2023). Die eigenen Ergebnisse verdeutlichen, dass bei der Betäubung von Rindern sowohl die korrekte Position des Schusses als auch der korrekte Einschusswinkel von Bedeutung sind, um eine effektive Betäubung zu gewährleisten.

Eine Abweichung vom optimalen Ansatz kann zu unzureichender Betäubung führen, da der Bolzen nicht an der korrekten Position in das Gehirn eindringt, somit können tiefe Hirnstrukturen nicht in ausreichendem Maße erreicht und geschädigt werden (Finnie 1993, Grandin 2010). In der vorliegenden Untersuchung lag die überwiegende Mehrheit der Schüsse innerhalb eines Radius von 2 cm vom optimalen Ansatzpunkt. Nur wenige Schüsse (2,0 %) wichen mehr als 2 cm davon ab, der überwiegende Anteil davon in rostrale Richtung. Der Anteil an Tieren mit Schussabweichungen über 2 cm liegt somit deutlich unter denen von Atkinson et al. (2013), die bei durchschnittlich 8,0 % der untersuchten Rinder Positionsabweichungen von über 2 cm feststellte.

Es wird deutlich, dass die Anzahl der in den eigenen Untersuchungen festgestellten Positionsabweichungen vergleichsweise gering ist. Gregory et al. (2007) identifizierte nur bei 48,7 % der Rinder eine Schussposition innerhalb von 2 cm um den idealen Schusspunkt. Bei Untersuchungen von Oliveira et al. (2018b) wurden bei 65,4 % von 353 untersuchten Rindern Schussabweichungen über 2 cm festgestellt. Vecerek et al. (2020) untersuchte Abweichungen der Schussposition in zwei verschiedenen

Rinderschlachtbetrieben und stellte fest, dass lediglich bei 46,9 % der Tiere der Schussansatz innerhalb eines Radius von 3 cm vom optimalen Ansatz lag. In der gleichen Untersuchung wurden bei 18 von insgesamt 627 Rindern Abweichungen von über 7 cm festgestellt, während in der vorliegenden Studie nur bei einem von 2.911 Rindern (0,03 %) eine derart hohe Abweichung auftrat. Das Fehlen einer Fixierungseinrichtung mit enger Kopffixierung oder geringere Fähigkeiten der betäubenden Person in der Studie von Vecerek et al. (2020) könnten mögliche Gründe für diese unterschiedlichen Ergebnisse sein.

Ähnlich wie bei Vecerek et al. (2020) traten in der eigenen Untersuchung Schussabweichungen nach unten deutlich häufiger auf als nach oben. Dieses Ergebnis unterscheidet sich von denen anderer Autoren (Gregory et al. 2007, Atkinson et al. 2013, Oliveira et al. 2018b), bei denen überwiegend Schussabweichungen caudal des optimalen Punktes festgestellt wurden.

Für die Abweichungen des Schussansatzes und das Abkippen des Schussapparates nach rostral sind verschiedene Erklärungen möglich. Wenn bei einer engen Fixierung des Kopfes der Kopftisch etwas zu weit hochgefahren wird, so dass die Stirn des Tieres während der Schussabgabe nicht waagrecht liegt, sondern etwas schräg mit der Nase nach oben ausgerichtet ist, erfolgt der Schuss eher unterhalb des Zielpunktes und der Schussapparat wird eher nach rostral abgekippt. Eine weitere mögliche Ursache könnte das reflexartige Zurückziehen der Rinder während des Ansetzens des Schussgerätes sein, das auch bei enger Fixierung im Zentimeterbereich noch möglich ist und insbesondere bei weniger geübten betäubenden Personen zu beobachten war.

Abweichungen des Einschusswinkels von mindestens 10 ° von der Senkrechten wurden in der vorliegenden Studie bei 12,8 % der Rinder ermittelt. Dies kann insbesondere bei Verwendung von Betäubungsgeräten mit einer unzureichenden Leistung die Wirksamkeit der Betäubung beeinträchtigen, da nicht ausreichend Energie für eine Gehirnerschütterung in alle Hirnbereiche transferiert wird. Im Gegensatz zu Abweichungen der Schussposition

lassen sich Winkelabweichungen nur mittels Sonde identifizieren. Es gibt nur wenige Untersuchungen, die neben der Schussposition auch den Einschusswinkel erfassen (Ilgert 1985). Dennoch sind sowohl der Schussansatz als auch der Winkel von entscheidender Bedeutung für einen optimal ausgeführten Betäubungsschuss. Selbst bei einem korrekt gewählten Ansatz können deutlich abweichende Einschusswinkel dazu führen, dass der Bolzen entweder gar nicht oder nur minimal in das Gehirn eindringt. Andererseits können leichte Abweichungen der Schussposition auch durch ein entsprechendes Abwinkeln des Schussgerätes korrigiert werden. Die ist beispielsweise notwendig, wenn der Schütze aufgrund einer ausgeprägten *Crista mediana* gezwungen ist, etwas paramedian anzusetzen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung bestätigen die Aussagen von Grist et al. (2019a) und Grandin et al. (2020), dass die Fertigkeiten der betäubenden Person einen hohen Einfluss auf die Schussgenauigkeit haben. Während bei einigen betäubenden Personen bei über 95,0 % der Tiere keine Winkelabweichungen festgestellt wurden, lag dieser Wert bei anderen unter 70,0 %. Gleiches galt für die Präzision der Schussposition, die je nach betäubender Person zwischen 61,0 % und 100,0 % variierte. Zu ähnlichen Ergebnissen kam auch Atkinson et al. (2013), die unter verschiedenen betäubenden Personen Schussabweichungen zwischen 5,0 % und 19,0 % feststellte. Die teilweise deutlichen Unterschiede zwischen den betäubenden Personen hinsichtlich der Positions- und Winkelabweichungen deuten darauf hin, dass regelmäßige Schulungen und übergeordnete Kontrollen notwendig sind, um die Durchführung der Betäubung zu optimieren (Fries et al. 2012).

Auch in Bezug auf Produktionsgruppe und Schlachtbetrieb ergab die vorliegende Untersuchung Unterschiede hinsichtlich der Schussgenauigkeit. Im Betrieb E gab es die meisten Positions- und Winkelabweichungen. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass hier zum Zeitpunkt der Untersuchung noch keine Betäubungsfalle mit enger Kopffixierung verwendetet wurde.

Beim Vergleich der Produktionsgruppen in Bezug auf den Schussansatz zeigte sich, dass Kühe deutlich weniger Abweichungen aufwiesen (4,4 %) als Bullen (12,0 %) und Färsen (11,6 %). Eine mögliche Ursache hierfür könnte im Temperament der Tiere und ihrem Verhalten in der Betäubungsfalle liegen, da Kühe in den meisten Fällen vertrauter im Umgang mit Menschen sind und weniger Abwehrreaktionen zeigen, die wiederum die Schussgenauigkeit beeinträchtigen können.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass es besonders bei einer hohen angestrebten Schlachtleistung notwendig ist, den Kopf der Tiere vorübergehend eng zu fixieren, um einen präzisen Schussansatz zu gewährleisten (von Holleben 2009, von Wenzlawowicz et al. 2012, LAV 2021). Dies sollte mit einer Betäubungsfalle mit enger Kopffixierung erfolgen.

Gemäß den Autoren Atkinson et al. (2013), Gregory et al. (2007) und Lambooi et al. (1981) führen geringfügige Abweichungen vom optimalen Ansatz oder Winkel nicht zwangsläufig zu einer verminderten Betäubungseffektivität. Diese Erkenntnis bestätigte sich auch in der vorliegenden Studie. Von insgesamt 2.911 untersuchten Rindern zeigten lediglich 19 Tiere eine reduzierte Betäubungseffektivität (0,65 %), während bei insgesamt 615 Rindern Positions- und/ oder Winkelabweichungen festgestellt wurden. Des Weiteren wurden auch Rinder identifiziert, die als fraglich oder nicht ausreichend betäubt kategorisiert wurden und deren Schussloch keinerlei Positions- oder Winkelabweichungen aufwies. Die Ursache kann in solchen Fällen neben einer nicht ausreichenden Leistung des Schussgerätes (von Wenzlawowicz et al. 2012, Gibson et al. 2015, EFSA 2020) auch in morphologischen Variationen und anatomischen Abweichungen der Köpfe liegen (Kohlen 2011, Grist et al. 2019a, Grist et al. 2021).

6.2 Überprüfung und Messung gerätebezogener Schlüsselparameter

Die vorliegenden Messungen der Austrittslänge und der Bolzengeschwindigkeit sind keine für die jeweiligen Gerätevariationen repräsentativen Messungen, da jeweils nur wenige Wiederholungsmessungen vorgenommen werden konnten. Variationen aufgrund von herstellungsbedingt schwankender Ladungsstärke können daher vergleichsweise stark zu

Buche schlagen. Auch kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass einzelne Geräte in geringgradig schlechterem Wartungszustand waren als andere. Die Schlüsselparameter genau zu überprüfen war jedoch auch nicht das Ziel der Untersuchungen. Es sollten vielmehr Annäherungswerte für möglichst viele Geräte und Varianten ermittelt werden. Eine präzise Aussage über das Verhalten des Bolzens beim Eindringen in einen Rinderschädel kann ohnehin mit keiner der gewählten Methoden getroffen werden, da der Bolzen in diesem Fall auf ein Medium mit deutlich höherem und variablem Widerstand trifft. Beide Methoden liefern daher lediglich eine Annäherung hinsichtlich der tatsächlichen Austrittslänge und Geschwindigkeit, jedoch ermöglichen sie eine Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Geräten. Auch grundsätzliche allgemeine Aussagen, beispielsweise zum Unterschied zwischen den Antriebsarten können abgeleitet werden.

6.2.1 Austrittslänge des Bolzens

Die Austrittslänge des Bolzens wurde mithilfe von zwei unterschiedlichen Methoden erfasst, zum einen mittels Blumensteckschaum und zum anderen mittels Hochgeschwindigkeitskamera. Anders als vermutet, führte eine Erhöhung der Treibladung oder des Drucks nur zu einer relativ geringen Steigerung der Austrittslänge von wenigen Millimetern und auch nicht bei allen Geräten. Dies liegt möglicherweise an dem fehlenden bzw. sehr geringen Widerstand, bei Messung der Geschwindigkeit in Luft und an der geringen Zahl an Wiederholungsmessungen. Anhand der Ergebnisse kann aber abgeleitet werden, dass die Austrittslänge abhängig vom Typ des verwendeten Gerätes und der Länge des Bolzens variiert.

Die Verwendung von Blumensteckschaum führte zu ähnlichen Ergebnissen für die Austrittslänge des Bolzens wie die Nutzung der Hochgeschwindigkeitskamera bei Messung in Luft. Blumensteckschaum hat den Vorteil, dass er ausgesprochen nachgiebig ist und somit die gemessene Eindringtiefe eine gute Annäherung an die Austrittslänge in Luft

darstellen könnte. Dennoch lagen die mittels Blumensteckschaum gemessenen Werte im Mittel 11,0 mm unter den per Hochgeschwindigkeitskamera ermittelten Werte.

Neben einer nicht ganz auszuschließenden Bremswirkung des Blumensteckschaums besteht eine mögliche Erklärung für diesen Unterschied darin, dass sich der zuvor komprimierte Schaum nach dem Schuss wieder leicht ausgedehnt haben kann. Am Ende des Schusskanals befand sich im Anschnitt des Blumensteckschaums jeweils ein etwa 1,0 cm breiter dunkler gefärbter Bereich, der durch Kompression entstanden sein kann, aber für den auch nicht ausgeschlossen werden kann, dass sich der Schaum wieder etwas ausgedehnt hat. Würde man zusätzlich zur lichten Kanallänge im Steckschaum auch die Länge dieses dunkleren Bereichs bei der Messung der Austrittslänge berücksichtigen, ergäbe sich eine noch bessere Vergleichbarkeit beider Methoden. Unter Berücksichtigung der so veränderten Messung kann die Steckschaum-Methode als eine einfache und kostengünstigere Alternative zur Hochgeschwindigkeitskamera verwendet werden, um die Austrittslänge annäherungsweise zu bestimmen.

In einer Untersuchung von Gibson et al. (2015) wurde die Austrittslänge verschiedener Geräte unter Verwendung von Ballistischer Seife analysiert. Die Messwerte für den Matador SS3000 (Termet), sowie den Cash® Magnum Typ Auto .25R (Frontmatec) ähneln den eigenen Ergebnissen. Lediglich die Werte für die Austrittslänge des Typs KS (Schermer®) liegen mit bis zu 14,8 mm deutlich unter den eigenen Ergebnissen. Ein möglicher Grund dafür könnte die Verwendung einer deutlich schwächeren Ladung (225 mg) für den Typ KS in den Untersuchungen von Gibson et al. (2015) sein.

6.2.2 Bolzengeschwindigkeit

Die Bolzengeschwindigkeit variierte teilweise stark zwischen den verschiedenen Gerätetypen. Ladungsbetriebene Geräte zeigten tendenziell höhere Geschwindigkeiten im Vergleich zu pneumatischen Geräten. Die Variation der Ladungsstärke und des Drucks hatte erwartungsgemäß einen Einfluss auf die Geschwindigkeit. Bei den Messungen mit dem Stun Tester fiel auf, dass bei einigen Geräten die Geschwindigkeit des ersten

Schusses geringgradig unter den Folgewerten lag. Ursache hierfür könnte das Erwärmen des Gerätes nach dem ersten Schuss sein, was zu einer verbesserten Leistung führen kann. Auch in den Ergebnissen zur Geschwindigkeitsmessung von Dörfler (2015) wurden teilweise Schwankungen von bis zu 5 m/s zwischen den einzelnen Messwerten ermittelt. Leichte Variationen der Messwerte können auch auf Schwankungen der Treibmittelmenge in den Kartuschen zurückgeführt werden. Grist et al. (2019b) führten Untersuchungen an Kartuschen durch und beobachtete dabei deutliche Variationen bezogen auf das Kartuschengewicht und die Menge an effektiver Treibladung. Dies führte zu Geschwindigkeitsunterschieden von bis zu 27 m/s bei Verwendung derselben Kartuschenstärke. Diese Beobachtungen implizieren, dass zur genauen Überprüfung der Bolzengeschwindigkeit eine Vielzahl von Messungen durchgeführt werden müssen, um ein korrektes Bild über die tatsächliche Leistung zu erhalten. Im Umkehrschluss kommt im Hinblick auf die praktische Anwendung als Ursache für eine verminderte Betäubungswirkung immer auch eine fehlerhafte Kartusche in Frage.

Der Vergleich der beiden Messmethoden ergab, dass sowohl der Stun Tester als auch die Hochgeschwindigkeitskamera zuverlässige Ergebnisse liefern.

Obwohl beide Methoden die Geschwindigkeit auf unterschiedliche Weise messen – mittels Hochgeschwindigkeitskamera wird sie über den gesamten Austrittsverlauf des Bolzens gemessen, während bei der Stun Tester-Methode nur eine Distanz von 25,4 mm in einem Abstand von 21,82 mm von der Bolzenmündung erfasst wird – ergeben sich dennoch nahezu gleiche Werte. Die Ursache hierfür könnte darin liegen, dass die Beschleunigung des Bolzens lediglich über eine sehr kurze Distanz erfolgt. Dies wurde bei den Auswertungen der Hochgeschwindigkeitskamera-Messungen deutlich. Abhängig vom Gerätetyp wurde die maximale Geschwindigkeit etwa 15 mm von der Bolzenmündung und nach ungefähr 0,15 s erreicht. Die erreichte Höchstgeschwindigkeit blieb anschließend bis kurz vor Erreichen der maximalen Austrittslänge konstant. Entsprechend ermittelten auch Oliveira et al. (2018a) und Gibson et al. (2015) in eigenen Untersuchungen nach ungefähr 16 mm bzw. 19 mm die höchsten Geschwindigkeitswerte. Daraus lässt sich ableiten, dass

für die Messung der Bolzengeschwindigkeit mittels auf Lichtschranken basierender Geräte der Abstand der Messstrecke von der Mündung des Schussgerätes unerheblich ist, solange die erste Lichtschranke mindestens 15 mm von der Mündung entfernt platziert ist.

Dies erklärt auch die sehr gute Übereinstimmung der in der vorliegenden Untersuchung gemessenen Geschwindigkeitswerte mit den Ergebnissen anderer Studien (Gibson et al. 2015, Grist et al. 2019b). Lediglich die Geschwindigkeitswerte von Dörfler (2015), die Bolzenschussgeräte der Firma Schermer® untersuchte, lagen konstant unter den eigenen Werten. Die Erklärung könnte darin liegen, dass Dörfler die Bolzengeschwindigkeit bereits ab 3 mm vor der Mündung über eine Distanz von nur 12 mm ermittelte. Im Vergleich zu den anderen Messmethoden erreicht der Bolzen an diesem Punkt noch nicht seine maximale Geschwindigkeit.

6.2.3 Herstellerangaben zu Austrittslänge und Bolzengeschwindigkeit

Die Hersteller sind gemäß Artikel 8 der VO (EG) Nr. 1099/2009 dazu verpflichtet, Gebrauchsanweisungen für die Betäubungsgeräte bereitzustellen, in denen sie die Eignung und Kapazität der jeweiligen Geräte sowie die Schlüsselparameter gemäß Anhang I Kapitel I beschreiben sollen. Aus den eigenen Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass es notwendig ist, bei Angaben zu den Schlüsselparametern immer auch mit anzugeben, welche Methode für die Ermittlung der jeweiligen Schlüsselparameter verwendet wurde. Dies wird nach eigenen Erfahrungen bisher in den seltensten Fällen berücksichtigt. In einigen Fällen fehlen in den Bedienungsanleitungen Angaben zu bestimmten Schlüsselparametern gänzlich.

6.2.4 Kinetische Energie

Mit errechneten Werten zwischen 186,1 J und 510,6 J für die kinetische Energie der Bolzen wurde eine große Spannweite für die untersuchten Gerätetypen und -variationen ermittelt. Es zeigen sich auch deutliche Unterschiede zwischen den Werten, die basierend auf Geschwindigkeitsmessungen beider Methoden berechnet wurden. Dies liegt auch daran,

dass die Geschwindigkeit quadratisch in die Berechnung der kinetischen Energie miteingeht. Trotz vergleichsweise niedrigerer Geschwindigkeiten bei pneumatischen Geräten, wurden für ihre kinetische Energie vergleichbare Werte berechnet wie für ladungsbetriebenen Geräten. Grund ist die vielfach höheren Bolzenmasse bei den pneumatischen Varianten.

Die Empfehlungen zu Mindestwerten für die Bolzengeschwindigkeiten für Kühe (55 m/s) und Bullen über 650 kg (72 m/s) (Daly et al. 1987, Bernat 1998, Gregory 1998, AVMA et al. 2016), können anhand der eigenen Ergebnisse nicht nachvollzogen werden. Keines der in dieser Arbeit untersuchten Geräte erreichte eine Geschwindigkeit von 72 m/s. Das Gerät mit der höchsten Geschwindigkeit, welches bei einer Vielzahl von schweren Bullen zur Betäubung verwendet wurde, erreichte eine Geschwindigkeit von 58,6 m/s (Typ KR, Schermer®, 320 mg). Der überwiegende Anteil an Rindern wurde mit einem von zwei pneumatisch betriebenen Geräten betäubt, für die eine maximale Geschwindigkeit von 42,6 m/s ermittelt wurde. Trotz dieser vergleichsweise niedrigen Werte war die Betäubungseffektivität sehr gut (99,4 %). Die eigene Studie zeigt, dass neben den in der VO (EG) Nr. 1099/2009 (2009) festgelegten Schlüsselparametern die kinetische Energie und damit auch die Bolzenmasse, vor allem bei pneumatischen Geräten, einen großen Einfluss auf die Betäubungseffektivität haben und mindestens ebenso entscheidend sind wie Geschwindigkeit, Austrittslänge und Durchmesser. Die Bolzenmasse bzw. kinetische Energie sollte somit als Schlüsselparameter in zukünftigen Verordnungsentwürfen berücksichtigt werden.

Gleichwohl verdeutlichen die vorliegenden Ergebnisse die Notwendigkeit, die Geräteparameter sorgfältig zu wählen, um sicherzustellen, dass die erforderliche Energie für eine wirksame Betäubung bereitgestellt wird und für die jeweils zu betäubende Tierkategorie ausreichend ist.

Neben der Auswahl des Gerätetyps und der Ladungsstärke spielt auch der Zustand des Gerätes bezüglich Reinigung und Wartung eine wichtige Rolle (von Wenzlawowicz et al.

2012, Gibson et al. 2015). Schmutz oder Rost im Gerät können zu einem hohen Energieverlust führen und die Effektivität der Betäubung stark herabsetzen. Daher ist es notwendig die Geräte täglich nach Verwendung zu reinigen und gemäß der Herstellerangaben regelmäßig zu warten.

6.3 Bewegungen und Zeitpunkt des Todes

Nach den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung zeigen 93,4 % der untersuchten Rinder Bewegungen nach Bolzenschussbetäubung, wobei in einigen Fällen Bewegungen bis zu acht Minuten nach dem Stich beobachtet wurden. Mit Ausnahme von spätem lateralem Biegen des Körpers, das mehr als zwei Minuten nach dem Stich auftrat und mit Atembewegungen einherging, konnte in dieser Studie kein Zusammenhang zwischen den beobachteten Bewegungen und anhaltender Empfindungs- und Wahrnehmungsfähigkeit hergestellt werden (rückwärtiges Aufziehen trat nicht auf).

Die Ergebnisse zeigen vielmehr, dass Bewegungen, in der beobachteten Form dieser Studie, nach erfolgreicher Betäubung als Ergebnis eines Ausfalls höherer motorischer Kontrollzentren im Gehirn regelmäßig auftreten können. Damit unterstützen die eigenen Ergebnisse auch die Aussagen von Maennl (1994), Terlouw et al. (2015), Verhoeven et al. (2015) und Terlouw et al. (2016a), dass Bewegungen im Zusammenhang mit Krämpfen nicht mit einem gleichzeitig aufrechterhaltenen Bewusstsein vereinbar sind. Studien von Terlouw et al. (2015) zeigen zudem, dass sich Bewegungen bei betäubten Rindern nicht von jenen unterscheiden, deren Rückenmark nach der Betäubung durchtrennt wurde. Spät auftretende Bewegungen, wie sie auch in dieser Untersuchung auftraten, lassen sich durch die supravitale Reagibilität der Skelettmuskulatur und Nervenfasern nach dem Abklingen vitaler Funktionen erklären.

Die VO (EG) Nr. 1099/2009 gibt vor, dass ein weiteres Zurichten des Tieres nach der Entblutung erst dann erfolgen darf, wenn keinerlei Lebenszeichen bei dem Tier festzustellen sind. Dem Tier sollen damit potenzielle Schmerzen erspart bleiben. Die deutsche

Tierschutz- Schlachtordnung fordert darüber hinaus, dass am betäubten Tier keinerlei Bewegungen mehr erkennbar sein dürfen.

Das geforderte Fehlen von Lebenszeichen wird häufig so interpretiert, dass der Tod vor weiteren Schlachtarbeiten eingetreten sein muss. Die in der Veterinärmedizin geltenden sicheren Anzeichen des Todes (Totenstarre, Rigor Mortis, Leichenflecken/ Livor Mortis, Erkalten, Verwesung und Mumifizierung) (Baumgärtner et al. 2020) sind im Kontext der Schlachtung nicht anwendbar. Infolgedessen muss in diesem Fall auf die sogenannten "unsicheren Anzeichen" zurückgegriffen werden. Atemstillstand, Koma, sowie lichtstarre weite Pupillen und im weiteren zeitlichen Verlauf auch Muskelatonie sind solche Anzeichen, welche im Kontext der Schlachtung praktische Anwendung finden. Sie werden als unsichere Anzeichen bezeichnet, da sie einzeln betrachtet nicht ausreichend sind, um den Tod sicher zu diagnostizieren. Andere Faktoren wie beispielsweise Medikamente können ähnliche Auswirkungen haben. Im Fall der Schlachtung, mit bekannter Todesursache (Entblutung), sind die aufgeführten Indikatoren jedoch ausreichend, um den Tod sicher zu bestätigen (EFSA AHAW Panel 2013, Baumgärtner et al. 2020).

Alle Definitionen für den Tod teilen eine gemeinsame Grundlage: den nicht umkehrbaren Ausfall der Kreislauffunktionen (klinischer Tod) und den vollständige Funktionsverlust des gesamten Gehirns, einschließlich des Hirnstamms (Hirntod), welche zusammengenommen als Individualtod bezeichnet werden (Baumgärtner et al. 2020). Im Falle des Ausbleibens einer dieser "kritischen Funktionen" wird die Funktionalität des Organismus unabänderlich gestört und führt binnen kürzester Zeit zum Versagen der Übrigen (Barclay 1981, Bernat 1998, Laureys 2005, Wijdicks et al. 2010, Lewis et al. 2019). Die Zeitspanne zwischen Individualtod und biologischem Tod wird als Supravitalphase bezeichnet, in welcher supravitale Reaktionen auftreten können, die auf postmortal ablaufende Prozesse zurückzuführen sind (Huijun et al. 1999, Baumgärtner et al. 2020). Je nach Gewebe kann sich diese Phase über mehrere Stunden erstrecken. Der Zeitraum der supravitalen Reagibilität der Skelettmuskulatur wird zwischen 8,5 Stunden (Huijun et al. 1999) und 20 Stunden post mortem angegeben (Baumgärtner et al. 2020). Dies wird auch durch die

Beobachtung von Bewegungen bei Individuen nach diagnostiziertem Hirntod belegt (de Freitas et al. 2005, Zubkov et al. 2008, Saposnik et al. 2014). Einige der von anderen Autoren beschriebenen Bewegungen (de Freitas et al. 2005, Zubkov et al. 2008, Saposnik et al. 2014) ähneln denjenigen, die in dieser Studie, während der Entblutung bei Rindern beobachtet wurden. Ein Beispiel dafür ist die gleichzeitige Beugung von Bein und Fuß, auch als Dreifacher Flexionsreflex bekannt, welcher beim Menschen durch Manipulation der Fußsohle ausgelöst wird und stark dem hier beschriebenen „Anwinkeln“ der Hintergliedmaße ähnelt. Ebenso verhält es sich mit den von Saposnik et al. (2014) beschriebenen Beinbewegungen mit Muskelzucken und den Lazarus-Zeichen, welche Ähnlichkeiten mit den in dieser Studie definierten „Schlagen“ und „Strecken“ der Hintergliedmaße (oft in Verbindung mit Gliedmaßenzittern), sowie dem „Anheben“ und „Einrollen“ der Vordergliedmaßen aufweisen. Bewegungen wie diese wurden in der vorliegenden Studie bei 12,1 % der Rinder in einem Zeitraum von über 3 Minuten nach Setzen des Entblutestichs beobachtet. In einzelnen Fällen wurden gleichartige Bewegungen sogar noch nach einer Zeitspanne von über 8 Minuten nach der Entblutung beobachtet. Zubkov et al. (2008) und de Freitas berichten von Zeitspannen von bis zu 32 h nach Diagnosestellung „Hirntod“ für derartige Bewegungsformen beim Menschen.

Es liegt daher nahe, dass angesichts der bis zu 20 h andauernden Reagibilität der Skelettmuskulatur, das Auftreten kurzzeitiger zuckender und reflexartiger Bewegungen der Gliedmaßen, bei einem ansonsten bereits erschlafften Körper (Muskelatonie), keine Zweifel an einem bereits eingetretenen Individualtod aufkommen lassen dürften, besonders wenn bereits fehlende Atmung, anhaltendes Koma und eine weite sowie lichtstarre Pupille erkennbar sind. Anders zu bewerten sind Aufrichtversuche, wie anhaltendes rückwertiges Aufbiegen, denen jedoch Atembewegungen und Anzeichen am Auge, wie beispielsweise ein positiver Kornealreflex vorrausgehen (Gregory et al. 1996, McKinstry et al. 2004, Grandin 2015). Bei gleichzeitig fehlenden Atembewegungen und geweiteter, sowie zentrierter Pupille, ist die in der Tierschutz-Schlachtverordnung (2012) geforderte vollständige Abwesenheit von Bewegungen als Voraussetzung für weitere Schlachtarbeiten

aus wissenschaftlicher Sicht jedoch nicht nachvollziehbar. Diese Forderung führt derzeit regelmäßig zu Problemen in der Praxis. Die Formulierung aus der VO (EG) Nr. 1099/2009 oder die Festlegung einer Mindestentblutezeit wären somit besser geeignet, um das angestrebte Ziel zu erreichen, schmerzhaft Eingriffe an noch wahrnehmungs- und empfindungsfähigen Tieren zu verhindern.

7 Schlussfolgerung

Die vorliegende Untersuchung befasste sich mit der Evaluierung gerätebezogener Schlüsselparameter verschiedener Bolzenschussgeräte sowie der Analyse von Bewegungen bei Rindern nach Bolzenschussbetäubung und deren Einflussfaktoren.

Die Ergebnisse geben einen Überblick über die technischen Eigenschaften unterschiedlicher Schussgeräte und legen Grundlagen für eine Weiterentwicklung der Geräte im Hinblick auf den Tierschutz und Arbeitsschutz. Über die Messung in Luft konnten Annäherungen an die tatsächliche Austrittslänge und Geschwindigkeit ermittelt, und verschiedene Geräte verglichen werden. Die Austrittslänge variierte abhängig vom Typ des verwendeten Gerätes und der Länge des Bolzens. Unterschiede in Bezug auf die Bolzengeschwindigkeit konnten auf die jeweilige Funktionsart des Gerätes und die verwendete Ladungsstärke bzw. den anliegenden Luftdruck zurückgeführt werden, wobei bei ladungsbetriebenen Geräten die Bolzengeschwindigkeit meistens höher lag als bei pneumatisch betriebenen Geräten. Zunehmende Antriebsenergie bewirkte eine Zunahme der Geschwindigkeit des austretenden Bolzens in Luft.

Es zeigte sich, dass auch die kinetische Energie für die Beurteilung der Wirksamkeit und Eignung des jeweiligen Gerätes berücksichtigt werden sollte. Die alleinige Orientierung an den bisher in der Verordnung genannten technischen Schlüsselparametern Durchmesser, Austrittslänge und Geschwindigkeit reicht gerade im Hinblick auf die Verwendung von pneumatischen Geräten nicht aus.

Die Diskrepanz zwischen Herstellerangaben und den eigenen Annäherungswerten zu Austrittslänge und Geschwindigkeit des Bolzens verdeutlicht die Notwendigkeit von standardisierten und überprüfbaren Methoden zur Beschreibung der Schlüsselparameter, sowie die regelmäßige Wartung und Reinigung der Geräte.

Die Ergebnisse bestätigen die Bolzenschussbetäubung als ein sehr zuverlässiges Verfahren, welches gut an die überaus variablen Anforderungen bei der Betäubung von

Rindern angepasst werden kann. Je nach Prozesstechnik (engere oder weniger enge Fixierung, Stichtechnik und Schlachtgeschwindigkeit) und Eigenschaften der zu betäubenden Tiere (Erregungszustand, Geschlecht, Rasse und Morphologie des Schädels) bestehen unterschiedliche Anforderungen an die Schussgeräte. Aufgrund dieser Komplexität ist es schwierig die Kriterien für die Schlüsselparameter lediglich anhand der bisher geforderten Tiergröße und –Art (Anhang I VO (EG) Nr. 1099/2009) zu definieren.

Die Erkenntnisse dieser Studie können dazu beitragen, die Beurteilung der Schussgeräte hinsichtlich ihrer Eignung zu erleichtern und damit eine effektive Betäubung, sowie die Einhaltung von Tierschutzanforderungen in Schlachtbetrieben zu gewährleisten. Ungeachtet dessen sollte auch zukünftig Forschung in enger Zusammenarbeit mit Herstellern und Schlachtbetrieben durchgeführt werden, um die Betäubungsgeräte kontinuierlich zu optimieren.

Gegenstand der vorliegenden Untersuchung war zudem die Beurteilung der Schussposition am betäubten Rind nach der Entblutung. Im Vergleich zu bisher durchgeführten Untersuchungen wurden deutlich weniger und geringfügigere Abweichungen hinsichtlich Schussposition und Einschusswinkel festgestellt. Die Ausführung des Betäubungsschusses durch erfahrene Schützen sowie, bei höheren Schlachtleistungen, auch der Einsatz moderner Fallen mit enger Kopffixierung trugen zur Verbesserung der Betäubungsqualität bei.

Sowohl die Wahl des Betäubungsgerätes und der jeweiligen Geräteparameter als auch die Fähigkeiten der betäubenden Person waren somit entscheidend für eine gute Betäubung. Dabei konnten nach den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung bei Verwendung leistungsstarker Schussgeräte leichte Winkelabweichungen von unter 15° und Positionsabweichungen von unter 3 cm in der Regel toleriert werden, ohne dass Auswirkungen auf die Betäubungseffektivität entstanden.

Die Analyse der Bewegungen nach der Bolzenschussbetäubung ergab, dass Bewegungen des Körpers regelmäßig bei gut betäubten Rindern vorkommen ($n= 93,5\%$) und abhängig

von Rasse, Tierkategorie und verwendetem Funktionstyp des Schussgerätes sowie Bolzengeschwindigkeit und Austrittslänge in ihrer Ausprägung variieren können. Verglichen mit dem hohen Anteil an Tieren mit Bewegungen wurden in der vorliegenden Studie nur wenig nicht ausreichend betäubte Rinder ($n= 10$) identifiziert. Bewegungen des Körpers, ohne gleichzeitige Anzeichen am Auge, Atembewegungen oder Ohrspannung, welche auf erhaltene Hirnstammfunktion hindeuten, sollten demnach nicht als alleiniges Anzeichen mangelhafter Betäubung oder wiederkehrenden Bewusstseins gewertet werden. Insbesondere spät auftretende Bewegungen lassen sich durch das Vorhandensein supravitaler Reagibilität der Skelettmuskulatur und Nervenfasern nach dem Abklingen vitaler Funktionen erklären. Es liegt nahe, dass derartige Bewegungen in Verbindung mit sicheren Anzeichen für eine irreversible Betäubung stehen und im späteren Verlauf keinen Zweifel am bereits eingetretenen Individualtod aufkommen lassen sollten. Den hier beschriebenen unwillkürlichen Bewegungen stehen zielgerichtete Aufrichtbewegungen entgegen, wie anhaltendes rückwertiges Aufbiegen. Letzteres wird jedoch von Atembewegungen und Anzeichen am Auge begleitet, was darauf hindeutet, dass eine Nachbetäubung erforderlich ist.

Die Ergebnisse der Untersuchung tragen dazu bei, die Betäubungseffektivität beim Rind besser bewerten zu können. Sie verdeutlichen zudem, wie wichtig die korrekte Interpretation von Bewegungen im Zusammenhang mit weiteren Anzeichen einer erhaltenen Empfindungs- und Wahrnehmungsfähigkeit ist. Obwohl Bewegungen des Körpers oft eindrucksvoll wirken können, ist es wichtig, sich auf den Kopf des Tieres zu konzentrieren, um verlässliche Indikatoren für die Effektivität der Betäubung rechtzeitig zu erkennen. Die gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit bieten wertvolle Informationen für die Rinderbetäubung und können dazu beitragen, den Tierschutz bei der Schlachtung zu verbessern.

8 Zusammenfassung

Analyse von Bewegungen bei Rindern nach Bolzenschussbetäubung in Zusammenhang mit Betäubungseffektivität -Evaluierung potenzieller Einflussfaktoren und gerätespezifischer Schlüsselparameter der Bolzenschussbetäubung

In der vorliegenden Arbeit wurden Bewegungen nach Bolzenschussbetäubung an insgesamt 2.911 Rindern auf fünf Schlachtbetrieben bis mindestens 4 Minuten nach Setzen des Entblutestichs beschrieben und analysiert. Die Bewegungen wurden mittels Action-Kameras (Apeman® A100) kontinuierlich erfasst und den 8 Prozessabschnitten (Auswurf, Aufziehen, Hautschnitt, Bruststich, 1. bis 4. Minute der Entblutung) zugeordnet. Darüber hinaus wurden Betäubungseffektivität und Qualität des Schussansatzes erhoben. Das Videomaterial wurde im Hinblick auf neun, im Vorfeld definierte Bewegungskategorien analysiert: Zappeln, Schlagen der Hintergliedmaßen, Strecken oder Anwinkeln der Hintergliedmaßen, Einrollen oder Anheben der Vordergliedmaßen, seitliches Biegen oder ventrales Krümmen des Rumpfes und rückwertiges Aufbiegen. Jeder Bewegung wurde ein Intensitätswert (Score) zugeordnet, der dann je Prozessabschnitt (Abschnittsscore) oder über alle Prozessabschnitte (Summen Score) aufsummiert wurde. Als mögliche Einflüsse auf die Scores wurden verschiedene tierbezogene (Tierkategorie, Rasse, Alter, Klassifizierung, Behornung), gerätebezogene (Gerätetyp, Funktionsart, Bolzengeschwindigkeit, -austrittslänge, -durchmesser, kinetische Energie) und prozesstechnische Faktoren (Schlachtbetrieb, Saison, betäubende Person, Schussansatz) untersucht (ANOVA-Analyse). Austrittslänge und Bolzengeschwindigkeit der verwendeten Geräte- und Ladungs-bzw. Druckkombinationen sowie einiger weiterer wurden in Annäherungsmessungen einerseits in Blumensteckschaum und durch Lichtschrankenmessung und andererseits durch Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera verifiziert. Die Ergebnisse wurden mit den Herstellerangaben verglichen.

Bei nahezu allen Rindern (93,4 %) trat mindestens eine Bewegung auf, am häufigsten während des Bruststichs und der ersten Minute der Entblutung. In einzelnen Fällen wurden Bewegungen noch 8 Minuten nach Setzen des Entblutestichs beobachtet. Rasse und Tierkategorie (Bulle, Färse, Kuh) hatten einen signifikanten Einfluss auf das Auftreten von Bewegungen. Kühe zeigten häufiger Bewegungen am Auswurf, während Bullen und Färsen über alle Prozessabschnitte hinweg einen höheren Summen Score aufwiesen. Die Rassen Braunvieh und Fleckvieh bewegten sich signifikant weniger als Deutsch Angus, Charolais oder Limousin. Durch die Verwendung von pneumatischen Schussgeräten sowie eine größere Austrittslänge des Bolzens konnten Bewegungen signifikant reduziert werden.

Von insgesamt 2.911 Tieren wurde die Betäubungseffektivität nur bei 19 Tiere (0,6 %) als „fraglich“ oder „nicht ausreichend betäubt“ eingestuft, und kein Tier zeigte rückwärtiges Aufbiegen. Ein Einfluss der Effektivität der Betäubung auf Bewegungen wurde nicht ermittelt. Rein deskriptiv unterschieden sich die Bewegungen von Tieren mit eingeschränkter Betäubungseffektivität nicht von ausreichend betäubten Rindern.

Schussansätze wichen bei 9,5 % der Rinder um mehr als 2 cm vom optimalen Ansatz ab, hauptsächlich in rostraler Richtung (83,5 %). Bei 12,8 % der Rinder traten Winkelabweichungen von mindestens 10 ° auf, wobei der Bolzenschussapparat in den meisten Fällen (43,4 %) zur Nase hin abgewinkelt wurde. Die Art der Fixierungseinrichtung und die jeweilige betäubende Person beeinflussten die Anzahl der beobachteten Positions- und Winkelabweichungen. Erst Abweichungen über 3 cm vom optimalen Ansatz und über 15 ° von der Senkrechten hatten ein höheres Risiko reduzierter Betäubungseffektivität zur Folge. Dieses Ergebnis muss jedoch auch in Zusammenhang mit den verwendeten Geräten, der Art der Bewegungseinschränkung und der Qualifikation der betäubenden Person gesehen werden.

Die Messungen mittels Hochgeschwindigkeitskamera ergaben, dass die Bolzengeschwindigkeit nach durchschnittlich 15 mm ab Schaftmündung ihr Maximum erreicht. Bei ladungsbetriebene Schussgeräten war die Bolzengeschwindigkeit in den

meisten Fällen höher als bei pneumatisch betriebenen Geräten. Dennoch wiesen letztere meist eine höhere kinetische Energie auf als viele der untersuchten ladungsbetriebenen Schussgeräte. Ursache hierfür ist das erheblich höhere Bolzengewicht bei pneumatischen Geräten (ladungsbetrieben: Ø 234 g, pneumatisch: Ø 516 g). Die Messwerte für die kinetische Energie lagen zwischen 186,1 J (Typ VSG-9LC, Dick) und 510,6 J (Typ VB-315, EFA). Die Austrittslänge variierte zwischen 63,6 mm (Typ Blitz Kerner, Turbocut) und 120,9 mm (Typ KL, Schermer®). Werte, gemessen in Blumensteckschaum, lagen durchschnittlich 11,0 mm unter den Messungen der Hochgeschwindigkeitskamera.

Bei der Untersuchung der technischen Merkmale verschiedener Schussgeräte ergab sich eine Diskrepanz zwischen Herstellerangaben und den eigenen Annäherungswerten. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit von standardisierten und überprüfbaren Methoden zur Beschreibung der Schlüsselparameter. Es zeigte sich, dass zur Beschreibung der Leistung eines Schussgerätes neben den in der VO (EG) Nr. 1099/2009 genannten technischen Schlüsselparametern Austrittslänge, Durchmesser und Geschwindigkeit auch die kinetische Energie eines Schussgerätes herangezogen werden sollte.

Erstmals konnten mit der vorliegenden Arbeit Bewegungen nach Bolzenschussbetäubung beim Rind systematisch beschrieben werden. Diese treten regelmäßig bei ausreichend betäubten Rindern auf und variieren je nach Rasse, Tierkategorie und Funktionstyp des Schussgerätes. Bewegungen ohne gleichzeitige Anzeichen am Auge oder Atembewegungen sollten, daher nicht als alleiniges Anzeichen mangelhafter Betäubung oder wiederkehrenden Bewusstseins⁴ gewertet werden. Gerade spät auftretende Bewegungen lassen sich durch vom Gehirn unabhängige und länger anhaltende supravitale Reagibilität der Skelettmuskulatur und Nervenfasern erklären und stehen somit aus der Sicht des Tierschutzes weiteren Schlachtarbeiten grundsätzlich nicht entgegen. Ausnahme hiervon ist das rückwertige Aufbiegen, eine zielgerichtete Aufrichtbewegung, die

⁴ Der Einfachheit halber wird in dieser Arbeit anstelle von „Empfindungs- und Wahrnehmungsfähigkeit“ analog dem englischen „consciousness“ der Begriff „Bewusstsein“ verwendet.

jedoch immer mit weiteren Anzeichen für eine erhaltene Hirnstammfunktion einhergeht. Eine präzise Einordnung von Bewegungen im Kontext der Beurteilung erhaltener Empfindungs- und Wahrnehmungsfähigkeit ist daher von großer Relevanz.

9 Summary

Analysis of movements in cattle after captive bolt stunning in relation to stunning effectiveness - Evaluation of potential impact factors and device-specific key parameters of Penetrative captive bolt stunning

In this study, movements after captive bolt stunning were described and analysed in a total of 2,911 cattle across five abattoirs, up to at least 4 minutes after sticking (exsanguination). Movements were continuously recorded using action cameras (Apeman® A100) and assigned to 8 process intervals (landing, hoisting, skin incision, chest stick, 1st to 4th minute of bleeding). Additionally, stunning effectiveness and shot accuracy were recorded. The video material was analysed for nine pre-defined movement categories: twitching, kicking hind limbs, stretching or bending hind limbs, bending or lifting forelimbs, body arching laterally or arching ventrally, and arching backwards. Each movement was assigned an intensity value (score), which was then totalled for each process interval (section score) or for all process intervals (sum score). Various animal-related (sex category, breed, age, carcass classification, horns), captive bolt-related (type, function type, bolt velocity, bolt exit length, bolt diameter, kinetic energy) and process-related factors (abattoir, season, staff performing the stunning, shot accuracy) were analysed as possible impact factors on the scores (ANOVA analysis). The exit length and bolt velocity of the device, as well as charge/pressure combinations used, were verified through proximity measurements using floral foam and light barrier measurement on one hand and a high-speed camera on the other. The results were compared with the manufacturer's specifications.

In almost all cattle (93.4 %), at least one movement occurred, most frequently during the chest stick and the first minute of bleeding. In individual cases, movements were still observed 8 minutes after sticking. Breed and sex category (bull, heifer, cow) significantly influenced the occurrence of movements. Cows more frequently showed movements during landing, while bulls and heifers had a higher sum score across all process intervals. Brown Swiss and Simmental breeds moved significantly less than German Angus, Charolais or

Limousin. Movements were significantly reduced by the use of pneumatic stunning devices and a higher exit length of the bolt.

Out of 2,911 animals, stunning effectiveness was classified as "doubtful" or "insufficiently stunned" in only 19 animals (0.6 %). No animal showed arching backwards. No association was found between stunning effectiveness and the movements observed. In purely descriptive terms, the movements of animals with limited stunning effectiveness did not differ from those of adequately stunned cattle. Shooting position in 9.5 % of cattle, deviated by more than 2 cm from the recommended position, mainly in rostral direction (83.5 %). Angular deviations of at least 10 ° occurred in 12.8 % of cattle, with the bolt gun being tilted towards the nose in most cases (43.4 %). The type of restraining device and the respective person performing the stunning impacted the number of observed positional and angular deviations. Only deviations of more than 3 cm from the optimal shooting position and more than 15 ° from the vertical resulted in a higher risk of reduced stunning effectiveness. However, this result must be seen in the context of the equipment used, the type of restraining box and the qualification of the person performing stunning. Measurements by high-speed camera showed that bolt velocity reaches its maximum after an average of 15 mm from the muzzle. In most cases, bolt velocity was higher in cartridge powered devices than in pneumatic devices. Nevertheless, kinetic energy of the latter usually was higher than for many of the cartridge powered devices investigated. This is because the bolt weight of pneumatic devices is considerably higher (cartridge powered: av. 234 g, pneumatic: av. 516 g). Measured values for kinetic energy ranged between 186.1 J (type VSG-9LC, Dick) and 510.6 J (type VB-315, EFA). Exit length varied between 63.6 mm (type Blitz Kerner, Turbocut) and 120.9 mm (type KL, Schermer®). Values measured in floral foam were on average 11.0 mm lower than those measured by high-speed camera.

When analysing the technical features of various stunning devices, there was often a discrepancy between the manufacturer's specifications and our own approximate values. This illustrates the need for standardised and verifiable methods to describe the key parameters. It became evident that, in addition to the technical key parameters exit length,

diameter and velocity specified in Regulation (EC) No 1099/2009, kinetic energy should also be used to describe the performance of a captive bolt stunning device.

For the first time movements after captive bolt stunning in cattle were systematically described. These movements occur regularly in well-stunned cattle and vary according to breed, sex category and the function type of the captive bolt stunner. Movements, that do not occur simultaneously with positive eye reflexes or respiratory movements should therefore not be interpreted as a sole sign of inadequate stunning effectiveness or regaining consciousness. Late movements, in particular, can be explained by prolonged supravital responsiveness of the skeletal muscles and nerve fibres that are independent from brain and consciousness. Therefore, from an animal welfare perspective these movements should not prevent further slaughter procedures. An exception to this is righting reflex of the head and/or body, which, however, is always accompanied by additional indicators of preserved brainstem function. Regarding the assessment of unconsciousness and insensibility a precise interpretation of movements in context with the assessment of unconsciousness and insensibility is therefore of great importance.

10 Erweitertes Literaturverzeichnis

Verordnung (EG) Nr. 1099/2009 des Rates vom 24. September 2009 über den Schutz von Tieren zum Zeitpunkt der Tötung (2009). Official Journal of the European Union L303

Adams, D. B. and A. D. Sheridan (2008). Specifying the risks to animal welfare associated with livestock slaughter without induced insensibility, Animal Welfare Branch, Product Integrity Animal and Plant Health Division, Australian Government Department of Agriculture, Fisheries and Forestry

Algers, B. and S. Atkinson (2007). Stun quality in relation to cattle size, gun type and brain hemorrhages. 13th international congress in animal hygiene, Tartu, Estonia, Swedish University of Agriculture Sciences, Department of Animal Environment and Health

Anil, M. H. (1991). "Studies on the return of physical reflexes in pigs following electrical stunning." Meat Science 30 (1): 13-21. [https://doi.org/10.1016/0309-1740\(91\)90030-T](https://doi.org/10.1016/0309-1740(91)90030-T)

Atkinson, S., A. Velarde and B. Algers (2013). "Assessment of stun quality at commercial slaughter in cattle shot with captive bolt." Animal Welfare 22 (4): 473-481. <https://doi.org/10.7120/09627286.22.4.473>

AVMA and HSA (2016). AVMA Guidelines for the Humane Slaughter of Animals,

AVMA, W. Underwood and R. Anthony (2020). "AVMA guidelines for the euthanasia of animals: 2020 edition." Retrieved on March 2013 (30): 2020-2021

Barclay, W. R. (1981). "Guidelines for the determination of death." JAMA 246 (19): 2194-2194

Baumgärtner, W. and A. Gruber (2020). Allgemeine Pathologie für die Tiermedizin. Stuttgart, DE, Georg Thieme Verlag.3132428558

Beloozerova, I. N. and M. G. Sirota (2003). "Integration of motor and visual information in the parietal area 5 during locomotion." Journal of neurophysiology 90 (2): 961-971. <https://doi.org/10.1152/jn.01147.2002>

Bernat, J. L. (1998). "A defense of the whole-brain concept of death." Hastings Center Report 28 (2): 14-23. <https://doi.org/10.2307/3527567>

Blackmore, D. K. (1989). "Electrocardiograms as an aid in assessing the stunning of cattle and pigs." New Zealand Veterinary Journal 37 (2): 59-61. <https://doi.org/10.1080/00480169.1989.35560>

Bouvier, J., V. Caggiano, R. Leiras, V. Caldeira, C. Bellardita, K. Balueva, A. Fuchs and O. Kiehn (2015). "Descending Command Neurons in the Brainstem that Halt Locomotion." Cell 163 (5): 1191-1203. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2015.10.074>

Brooks, J. and I. Tracey (2005). "REVIEW: From nociception to pain perception: imaging the spinal and supraspinal pathways." Journal of Anatomy 207 (1): 19-33. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2005.00428.x>

bsi Schwarzenbek – Beratungs- und Schulungsinstitut für Tierschutz bei Transport und Schlachtung (2023). bsi Standards zur Bewertung der Betäubungseffektivität bei Rind, Schwein und Schaf bsi Schwarzenbek: 9 <http://www.bsi-schwarzenbek.de/Dokumente/bsi%20Standards%20Betteff%20Bolzen%20Elektro%20CO2%20Rotfleisch%202023.pdf>

Budras, K. D. and A. Wünsche (2006). 4. Kapitel: Zentralvervensystem und Gehirnnerven. Atlas der Anatomie des Rindes: Lehrbuch für Tierärzte und Studierende. Mit Supplement Klinisch-funktionelle Anatomie, Schlütersche.3842683693

Carlson, N. R. and M. A. Birkett (2017). Control of Movement. Physiology of behavior. A. Chow. Harlow, UK, Pearson: 245- 274.1292158107

Conci, F., F. Procaccio, M. Arosio and L. Boselli (1986). "Viscero-somatic and viscero-visceral reflexes in brain death." J Neurol Neurosurg Psychiatry 49 (6): 695-698. <https://doi.org/10.1136/jnnp.49.6.695>

Daly, C. C., N. G. Gregory and S. B. Wotton (1987). "Captive bolt stunning of cattle: effects on brain function and role of bolt velocity." British Veterinary Journal 143 (6): 574-580. [https://doi.org/10.1016/0007-1935\(87\)90049-2](https://doi.org/10.1016/0007-1935(87)90049-2)

de Freitas, G. R. and C. André (2005). "Absence of the Babinski sign in brain death." Journal of neurology 252 (1): 106

Dörfler, K. (2015). Assessment of the efficiency of different captive bolt stunning devices in cattle and their influence on the degree of bleeding. Thesis, Universität Leipzig

Downman, C. and B. McSwiney (1946). "Reflexes elicited by visceral stimulation in the acute spinal animal." The Journal of physiology 105 (1): 80

Drawer, K. (1987). "Die Praxis der Schlachtierbetäubung aus der Sicht des Tierschutzes." Tierärztliche Umschau 11: 878-885

Dugdale, A. H. A., G. Beaumont, C. Bradbrook and M. Gurney (2020). Veterinary Anaesthesia: Principles to Practice, Wiley.9781119246770

EFSA (2004). Opinion of the Scientific Panel on Animal Health and Welfare on a request from the Commission related to welfare aspects of the main systems of stunning and killing the main commercial species of animals, EFSA: 1-29

EFSA (2006). "Opinion of the Scientific Panel on Animal Health and Welfare (AHAW) on a request from the Commission related with the welfare aspects of the main systems of stunning and killing applied to commercially farmed deer, goats, rabbits, ostriches, ducks, geese." EFSA Journal 4 (3): 326. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2006.326>

EFSA (2020). "Welfare of cattle during killing for purposes other than slaughter on-farm killing of cattle." EFSA Journal 18 (11): e06312. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6312>

EFSA AHAW Panel (2013). "Scientific Opinion on monitoring procedures at slaughterhouses for bovines." EFSA Journal 11 (12). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2013.3460>

Endres, J. M. (2005). Effectiveness of concussion stunning in comparison to captive bolt stunning in routine slaughtering of cattle. Thesis, Ludwig-Maximilians-Universität <https://doi.org/10.5282/edoc.4344>

Finnie, J. W. (1993). "Brain damage Caused by a Captive Bolt Pistol." J. Comp. Path. 109 (3): 253-258. [https://doi.org/10.1016/s0021-9975\(08\)80250-2](https://doi.org/10.1016/s0021-9975(08)80250-2)

Finnie, J. W., J. Manavis, P. C. Blumbergs and G. E. Summersides (2002). "Brain damage in sheep from penetrating captive bolt stunning." Australian Veterinary Journal 80 (1-2): 67-69. <https://doi.org/10.1111/j.1751-0813.2002.tb12053.x>

- Fries, R., K. Schrohe, F. Lotz and G. Arndt (2012). "Application of captive bolt to cattle stunning - a survey of stunner placement under practical conditions." *Animal* 6 (7): 1124-1128. <https://doi.org/10.1017/S1751731111002667>
- Gibson, T. J., E. King, J. Spence and G. Limon (2019). "Pathophysiology of Concussive Non-Penetrative Captive Bolt Stunning of Turkeys." *Animals (Basel)* 9 (12). <https://doi.org/10.3390/ani9121049>
- Gibson, T. J., C. W. Mason, J. Y. Spence, H. Barker and N. G. Gregory (2015). "Factors affecting penetrating captive bolt gun performance." *J Appl Anim Welf Sci* 18 (3): 222-238. <https://doi.org/10.1080/10888705.2014.980579>
- Gilliam, J. N., J. K. Shearer, J. Woods, J. Hill, J. Reynolds, J. D. Taylor, R. J. Bahr, S. Crochik and T. A. Snider (2023). "Captive-bolt euthanasia of cattle: determination of optimal-shot placement and evaluation of the Cash Special Euthanizer Kit® for euthanasia of cattle." *Animal Welfare* 21 (1): 99-102. <https://doi.org/10.7120/096272812X13353700593806>
- Grandin, T. (1998). "Objective scoring of animal handling and stunning practices at slaughter plants." *Journal of the American Veterinary Medical Association* 212 (1): 36-39
- Grandin, T. (2002). "Return-to-sensibility problems after penetrating captive bolt stunning of cattle in commercial beef slaughter plants." *Journal of the American Veterinary Medical Association* 221 (9): 1258-1261
- Grandin, T. (2010). "Auditing animal welfare at slaughter plants." *Meat Science* 86: 56-65. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.04.022>
- Grandin, T. (2012). "Auditing animal welfare and making practical improvements in beef-, pork- and sheep-slaughter plants." *Animal Welfare* 21 (1): 29-34. <https://doi.org/10.7120/096272812x13353700593400>
- Grandin, T. (2015). How to determine insensibility (unconsciousness) in cattle, pigs, and sheep in slaughter plants, Grandin, T.
- Grandin, T. and M. Cockram (2020). *The Slaughter of Farmed Animals: Practical Ways of Enhancing Animal Welfare*. Wallingford OX10 8DE, UK, CABI International. 9781789240573
- Gregory, N. G. (1998). *Stunning and slaughter. Animal welfare and meat science*. N. G. Gregory and T. Grandin. Wallingford, Oxon, UK, CABI Pub.: 223-240.
- Gregory, N. G., M. H. Anil, J. L. McKinsty and C. C. Daly (1996). "Prevalence and duration of insensibility following electrical stunning in calves." *New Zealand Veterinary Journal* 44 (1): 1-3
- Gregory, N. G., H. R. Fielding, M. von Wenzlawowicz and K. von Holleben (2010). "Time to collapse following slaughter without stunning in cattle." *Meat Science* 85: 66-69. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.12.005>
- Gregory, N. G., C. J. Lee and J. P. Widdicombe (2007). "Depth of concussion in cattle shot by penetrating captive bolt." *Meat Sci* 77 (4): 499-503. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.04.026>
- Gregory, N. G. and F. Shaw (2000). "Penetrating Captive Bolt Stunning and Exsanguination of Cattle in Abattoirs." *Journal of Applied Animal Welfare Science* 3 (3): 215-230. https://doi.org/10.1207/s15327604jaws0303_3

- Gregory, N. G., J. Y. Spence, C. W. Mason, A. Tinarwo and L. Heasman (2009). "Effectiveness of poll stunning water buffalo with captive bolt guns." *Meat Science* 81 (1): 178-182. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.07.016>
- Grillner, S., P. Wallén, K. Saitoh, A. Kozlov and B. Robertson (2008). "Neural bases of goal-directed locomotion in vertebrates - An overview." *Brain Research Reviews* 57 (1): 2-12. <https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2007.06.027>
- Grist, A., T. G. Knowles and S. Wotton (2019a). "Macroscopic Examination of Multiple-Shot Cattle Heads-An Animal Welfare Due Diligence Tool for Abattoirs Using Penetrating Captive Bolt Devices?" *Animals (Basel)* 9 (6). <https://doi.org/10.3390/ani9060328>
- Grist, A., J. A. Lines, R. Bock, T. G. Knowles and S. B. Wotton (2019b). "An Examination of the Performance of Blank Cartridges Used in Captive Bolt Devices for the Pre-Slaughter Stunning and Euthanasia of Animals." *Animals (Basel)* 9 (8). <https://doi.org/10.3390/ani9080552>
- Grist, A. and S. B. Wotton (2021). "A Case of Multiple Stun Attempts in a Bovine Due to Chronic Disease Process Causing Cranial Abnormalities." *Animals (Basel)* 11 (1). <https://doi.org/10.3390/ani11010116>
- Gutierrez, G., H. D. Reines and M. E. Wulf-Gutierrez (2004). "Clinical review: hemorrhagic shock." *Crit Care* 8 (5): 373-381. [10.1186/cc2851](https://doi.org/10.1186/cc2851)
- Hemsworth, P., A. D. Fisher, D. J. Mellor and C. B. Johnson (2009). A scientific comment on the welfare of sheep slaughtered without stunning: 18
- Hilsenbeck, E. M. (2007). Examinations of bleeding-time in cattle after captive bolt stunning. Thesis, Ludwig-Maximilians-Universität <https://doi.org/10.5282/edoc.6897>
- Huijun, W., B. Hoppe, C. Henssge and W. Zhongbi (1999). "Supravitale Morphologische Veränderungen der Skelettmuskulatur in frühen Postmortalen Zeitintervallen." *Journal of Tongji Medical University* 19: 34-39. <https://doi.org/10.1007/BF02895591>
- Ilgert, H. (1985). Effizienz der Bolzenschussbetäubung beim Rind mit Berücksichtigung der Einschussstelle und der Eindringrichtung des Bolzens unter Praxisbedingungen. Thesis, Freie Universität Berlin
- Ivan, L. P. (1973). "Spinal reflexes in cerebral death." *Neurology* 23 (6): 650-650. <https://doi.org/10.1212/WNL.23.6.650>
- Jørgensen, E. (1973). "Spinal man after brain death: The unilateral extension-pronation reflex of the upper limb as an indication of brain death." *Acta neurochirurgica* 28 (4): 259-273. <https://doi.org/10.1007/BF01405645>
- Kass, L. R. (1971). "Death as an Event: A Commentary on Robert Morison: Attempts to blur the distinction between a man alive and a man dead are both unsound and dangerous." *Science* 173 (3998): 698-702. <https://doi.org/10.1126/science.173.3998.698>
- Kitchell, R. L. and H. H. Erickson (2013). *Animal Pain: Perception and Alleviation*, Springer New York. 9781461475620
- Kline, H. C., D. R. Wagner, L. N. Edwards-Callaway, L. R. Alexander and T. Grandin (2019). "Effect of captive bolt gun length on brain trauma and post-stunning hind limb activity in finished cattle *Bos taurus*." *Meat Sci* 155: 69-73. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.05.004>

- Kohlen, S. (2011). Analysis about the accurate target for the stunning of cattle with the captive bolt pistol before slaughter. Thesis, Ludwig-Maximilians-Universität
- König, H. E., C. Mülling, J. Seeger and H. G. Liebich (2018). Nervensystem (Systema nervosum). Anatomie der Haustiere H. G. Liebich, Thieme: 513- 582.9783132425095
- Lambooj, E. and B. Algers (2016). "Mechanical stunning and killing methods." Animal Welfare at Slaughter. 5M Publishing. Sheffield, UK: 91-110
- Lambooj, E., C. Pieterse, C. M. Potgieter, J. D. Snyman and G. L. Nortje (1999). "Some neural and behavioural aspects of electrical and mechanical stunning in ostriches." Meat Science 52: 339-345. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(99\)00011-X](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(99)00011-X)
- Lambooj, E. and W. Spanjaard (1981). "Effect of the shooting position on the stunning of calves by captive bolt." The Veterinary Record 109 (16): 359-361. <https://doi.org/10.1136/vr.109.16.359>
- Laureys, S. (2005). "Death, unconsciousness and the brain." Nature Reviews Neuroscience 6 (11): 899-909. <https://doi.org/10.1038/nrn1789>
- LAV, A. T. (2021). Handbuch Tierschutzüberwachung bei der Schlachtung und Tötung, AG Tierschutz LAV
- Lewis, A., R. J. Bonnie, T. Pope, L. G. Epstein, D. M. Greer, M. P. Kirschen, M. Rubin and J. A. Russell (2019). "Determination of death by neurologic criteria in the United States: the case for revising the Uniform Determination of Death Act." The Journal of Law, Medicine & Ethics 47 (4_suppl): 9-24. <https://doi.org/10.1177/1073110519898039>
- Lücking, A., H. Louton, M. von Wenzlawowicz, M. Erhard and K. von Holleben (2024). "Movements after Captive Bolt Stunning in Cattle and Possible Animal- and Process-Related Impact Factors—A Field Study." Animals 14 (7): 22. <https://10.3390/ani14071112>
- Maennl, M. (1994). "Betäubung und Entblutung von Schwein und Rind." Mitteilungsblatt-Bundesanstalt für Fleischforschung Kulmbach 1 (126): 347- 347
- Martin, M. S., H. C. Kline, D. R. Wagner, L. R. Alexander, L. N. Edwards-Callaway and T. Grandin (2018). "Evaluation of different captive bolt lengths and breed influence upon post-stun hind limb and forelimb activity in fed cattle at a commercial slaughter facility." Meat Sci 143: 159-164. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.05.003>
- Marzin, V., J. F. Collobert, L. Jaunet and L. Marrec (2008). "Critères pratiques de mesure de l'efficacité et de la qualité de l'étourdissement par tige perforante chez le bovin." Revue de Medecine Veterinaire 159 (8-9): 423-430
- McKinstry, J. L. and M. H. Anil (2004). "The effect of repeat application of electrical stunning on the welfare of pigs." Meat Science 67 (1): 121-128. <https://10.1016/j.meatsci.2003.10.002>
- Moje, M. (2001). "Aktuelles aus der internationalen Fleischforschung Betäubung und Schlachtung, Dekontamination." Fleischwirtschaft 10: 92-94
- Morison, R. S. (1971). "Death: process or event?" Science 173 (3998): 694-698. <https://doi.org/10.1126/science.173.3998.694>
- Oliveira, S. E. O., F. A. Dalla Costa, T. J. Gibson, O. A. D. Costa, A. Coldebella and N. G. Gregory (2018a). "Evaluation of brain damage resulting from penetrating and non-penetrating stunning in Nelore Cattle using pneumatically powered captive bolt guns." Meat Sci 145: 347-351. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.07.016>

Oliveira, S. E. O., N. G. Gregory, F. A. Dalla Costa, T. J. Gibson, O. A. Dalla Costa and M. J. R. Paranhos da Costa (2018b). "Effectiveness of pneumatically powered penetrating and non-penetrating captive bolts in stunning cattle." *Meat Sci* 140: 9-13. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.02.010>

Paulsen, P. (2001). "Ein Beitrag zum Stand der Schlachtbetäubung in der Zeit von 1890-1930 [A contribution to the history of stunning of slaughter animals from 1890 to 1930]." *Wiener tierärztliche Monatsschrift* 88: 169-178

Paulsen, P., U. Hagen, F. J. M. Smulders and H. E. König (2003). "Bolzenschussbetäubung bei Rindern." *Fleischwirtschaft* 83 3/2003: 80-86

Paulsen, P., U. M. Hagen, F. J. M. Smulders and H. E. Honig (2001). "Bolzenschussbetäubung bei Schlachtrindern und -schweinen: anatomische Überlegungen [Captive bolt stunning of cattle and pig - anatomical considerations]." *Wiener tierärztliche Monatsschrift* 88: 210-218

Riek, W. (1980). Die Betäubung von Rindern vor dem Schlachten mit Hilfe des Bolzenschuss-Apparates. Thesis, Universität Zuerich

Russell, J. A., L. G. Epstein, D. M. Greer, M. Kirschen, M. A. Rubin and A. Lewis (2019). "Brain death, the determination of brain death, and member guidance for brain death accommodation requests: AAN position statement." *Neurology* 92 (5): 228-232. <https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000006750>

Salomon, F. V., H. Geyer and U. Gille (2008). 7 Nervensystem, Systema nervosum. Anatomie für die Tiermedizin. Stuttgart, DE, Enke.3830410751

Saposnik, G., V. S. Basile and G. B. Young (2014). "Movements in brain death: a systematic review." *Canadian Journal of Neurological Sciences* 36 (2): 154-160. <https://doi.org/10.1017/s031716710000651x>

Schaible, H. G., G. S. von Banchet, M. K. Boettger, R. Bräuer, M. Gajda, F. Richter, S. Hensellek, D. Brenn and G. Natura (2010). "The role of proinflammatory cytokines in the generation and maintenance of joint pain." *Annals of the New York Academy of Sciences* 1193 (1): 60-69. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.05301.x>

Schütt-Abraham, I. and H. J. Wormuth (2002). [Stunning of slaughter animals in accordance with animal welfare]. *Proceedings des Kongresses des Bundesverbandes der beamteten Tierärzte (BbT) in Bad Staffelstein am 22./23. April 2002*: 244-53

Schwarz, J. (2015). Assessment of the efficiency of captive-bolt stunning in young bulls and the potential to develop an automatic monitoring system. Thesis, Universität Leipzig

Shaw, N. A. (2002). "The neurophysiology of concussion." *Progress in neurobiology* 67 (4): 281-344. [https://doi.org/10.1016/S0301-0082\(02\)00018-7](https://doi.org/10.1016/S0301-0082(02)00018-7)

Spittler, J. F., D. Wortmann, M. Von Düring and W. Gehlen (2000). "Phenomenological diversity of spinal reflexes in brain death." *European Journal of Neurology* 7 (3): 315-321. [10.1046/j.1468-1331.2000.00062.x](https://doi.org/10.1046/j.1468-1331.2000.00062.x)

Terlouw, C., C. Bourguet and V. Deiss (2016a). "Consciousness, unconsciousness and death in the context of slaughter. Part I. Neurobiological mechanisms underlying stunning and killing." *Meat Sci* 118: 133-146. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.03.011>

Terlouw, C., C. Bourguet and V. Deiss (2016b). "Consciousness, unconsciousness and death in the context of slaughter. Part II. Evaluation methods." *Meat Sci* 118: 147-156. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.03.010>

Terlouw, E. M., C. Bourguet, V. Deiss and C. Mallet (2015). "Origins of movements following stunning and during bleeding in cattle." *Meat Sci* 110: 135-144. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.07.010>

TierSchG - Tierschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. Mai 2006 (BGBl. I S. 1206, 1313), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 20 des Gesetzes vom 20. Dezember 2022 (BGBl. I S. 2752) geändert worden ist (2006).

TierSchIV- Verordnung zum Schutz von Tieren im Zusammenhang mit der Schlachtung oder Tötung zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 1099/2009 des Rates (2012). BGBl. I S. 2982

Trepel, M. (2022). *Neuroanatomie: Struktur und Funktion*, Elsevier Health Sciences.3437062786

TROEGER, K. (2010). "Kontrollmöglichkeiten der Wirksamkeit von Betäubung und Entblutung bei der industriellen Schweineschlachtung." *Amtstierärztl.Dienst Lebensmittelkontrolle*. 3/2010: 4

TVT (2018). Merkblatt Nr. 75 Töten von Nutztieren durch Halter oder Betreuer Nottötung Rind-Bolzenschuss, TVT e.V.

TVT (2020). Merkblatt Nr. 188 Tierschutzfachliche Bewertung von Nachschüssen bei der Bolzenschussbetäubung von Rindern, TVT e.V.

Uniform Determination of Death Act (UDDA) (1981).

Vandavelde, M., J. A. and J. Lang (2001). *Veterinärmedizinische Neurologie. Ein Leitfaden für Studium und Praxis*. Berlin, Parey Buchverlag

Vecerek, V., J. Kamenik, E. Voslarova, M. Volfova, Z. Machovcova, J. Konvalinova and L. Vecerkova (2020). "The Impact of Deviation of the Stun Shot from the Ideal Point on Motor Paralysis in Cattle." *Animals (Basel)* 10 (2). <https://doi.org/10.3390/ani10020280>

Verhoeven, M. T., M. A. Gerritzen, L. J. Hellebrekers and B. Kemp (2015). "Indicators used in livestock to assess unconsciousness after stunning: a review." *Animal* 9 (2): 320-330. <https://doi.org/10.1017/S1751731114002596>

Verhoeven, M. T. W. (2016). *Assessing unconsciousness in livestock at slaughter*. Thesis PhD thesis, Wageningen Univ. <https://doi.org/10.18174/388582>

von Holleben, K. (2009). "Intelligent prevention of fail stunning – interpreting clinical symptoms correctly during stunning and bleeding out." *Fleischwirtschaft International* 24 (2): 26-30

von Holleben, K. (2010). *Obligatory stunning prior to cut with exemption for particular "methods" of slaughter required by certain religious rites - Unwanted effects of an exemption without quantitative limitation to the market demand: example Belgium and France. Animal Welfare at Religious Slaughter - The Ethics Workshops of the DIALREL Project. Bd. 6 der Reihe >Das Recht der Tiere und der Landwirtschaft<. J. Caspar and J. Luy, NOMOS Baden-Baden: 227-231.978-3-8329-4898-6; http://library.vetmed.fu-berlin.de/resources/global/contents/3745267/Luy_DIALREL.pdf*

von Holleben, K., A. Lücking and M. von Wenzlawowicz (2023). "Bewertung der Betäubungseffektivität nach Bolzenschussbetäubung beim Rind - Teil 1: Aufrichten, Reflexe am Auge und Atembewegungen from <http://www.bsi-schwarzenbek.de/PPT/Bolzenschussbet%C3%A4ubung%20Rind%20-%20Teil%201%220Bet%C203%A204ubungseffektivit%C203%A204t.ppsx>

von Holleben, K., J. Luy and K. Koepernik (2008). "DIALREL - ein EU Projekt zur Förderung des Dialoges rund um die rituelle Schlachtung." TVT Nachrichten 2: 19-23

von Holleben, K., A. Schütte, M. von Wenzlawowicz and N. Bostelmann (2002). "Handlungsbedarf am Schlachthof, Missstände bei der CO₂-Betäubung von Schlachtschweinen und der Bolzenschussbetäubung von Rindern." Fleischwirtschaft International 82 (5): 28-29

von Wenzlawowicz, M., K. von Holleben and E. Eser (2012). "Identifying reasons for stun failures in slaughterhouses for cattle and pigs: a field study." Animal Welfare 21 (S2): 51-60. <https://doi.org/10.7120/096272812x13353700593527>

Warriss, P. (1984). "Exsanguination of animals at slaughter and the residual blood content of meat." The Veterinary Record 115 (12): 292-295

Werner, J. (2011). Pschyrembel Klinisches Wörterbuch. Berlin, De Gruyter Verlag

Widderich, M. (1990). Über das tierschutzgerechte Töten von Wirbeltieren. Thesis, Tierärztliche Hochschule Hannover

Wijdicks, E. F., P. N. Varelas, G. S. Gronseth, D. M. Greer and N. American Academy of (2010). "Evidence-based guideline update: determining brain death in adults: report of the Quality Standards Subcommittee of the American Academy of Neurology." Neurology 74 (23): 1911-1918. <https://doi.org/10.1212/WNL.0b013e3181e242a8>

Zubkov, A. Y. and E. F. Wijdicks (2008). "Plantar flexion and flexion synergy in brain death." Neurology 70 (19): e74-e74. <https://doi.org/10.1212/01.wnl.0000311393.07219.a2>

11 Anhang

11.1 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1.** Erfassung der seitlichen Winkelabweichungen des Schussansatzes mittels Kunststoffsonde und Geodreieck am Ende der Entblutestrecke. Bei diesem Tier liegt die ermittelte seitliche Winkelabweichung unter 10 °32
- Abbildung 2.** Richtungsabweichungen vom optimalen Schusspunkt wurden mithilfe eines gedachten Ziffernblattes (links) und eines Multi-Winkel-Lineals (rechts) am Tierkopf erhoben. Abweichungen wurden in Zentimeterabstand vom optimalen Ansatz (1 cm über einem Kreuzungspunkt zweier gedachter Linien zwischen Augenmitte und Mitte des gegenüberliegenden Hornansatzes) angegeben. Bei diesem Tier wurde der Schusspunkt optimal getroffen.33
- Abbildung 3.** Messung der Austrittslänge mittels Steckschaum-Methode. Links: Schermer® Typ KR mit Distanzstück auf Blumensteckschaum eingespannt in eine Schraubzwinde; rechts: Schusskanäle im Steckschaum nach Beschuss mit Cash® Typ Magnum Auto .22 unter Verwendung von roter und schwarzer Ladung.....35
- Abbildung 4.** Blumensteckschaum eingespannt zwischen 2 Brettern für den Beschuss mit dem Jarvis® Typ USSS-21 (Schussapparat ebenfalls eingespannt in eine Schraubzwinde).
.....35
- Abbildung 5.** Messung der Austrittslänge und Geschwindigkeit des Bolzens mittels Hochgeschwindigkeitskamera. Schermer® Typ KS vor der Schussabgabe eingespannt in die Halterung mit angebrachtem Meterstab (oranger Pfeil) als Referenz für die Austrittslänge.....36
- Abbildung 6.** Hochgeschwindigkeitskamera ausgerichtet auf den Bereich vor der Bolzenmündung (Schussapparat nicht eingespannt) für die Messung der Bolzenaustrittslänge und -geschwindigkeit.....36

Abbildung 7. Filmausschnitt des aufgezeichneten Schussvorgangs mittels Hochgeschwindigkeitskamera; rechts im Bild jeweils der eingespannte Meterstab. Links: erstes Sichtbarwerden des distalen Bolzenendes mit Markierung eines „Tracker Punktes“; rechts: maximale Auslenkung des Bolzens von 79,5 mm. 37

Abbildung 8. Darstellung des Bolzenaustritts mittels Tracker Programm; Y-Achse: Auslenkung des Bolzens in mm (türkise Kurve); X-Achse: Zeit in s; Pink/blau: Beschleunigung des Bolzens..... 37

Abbildung 9. Lagemaße zum Summen Score der jeweiligen Untersuchungsgruppen auf den verschiedenen Betrieben (A-E). Der Summen Score ergibt sich aus den Scores der acht einzelnen Prozessintervalle (Auswurf bis 4. Minute der Entblutung), die jeweils die Gesamtsumme der Scorewerte aller beobachteten Bewegungen in diesem Intervall darstellen. Jeder Bewegung wurde entsprechend ihrer Intensität einem Score zwischen 0,5 und 3 zugeordnet. 64

Abbildung 10. Verteilung der betäubten Rinder, differenziert nach Produktionsgruppe (B = Bulle, F= Färse, K= Kuh) auf alle betäubenden Personen (1-14)..... 66

Abbildung 11. Lagemaße zum Summen Score der jeweiligen Untersuchungsgruppen differenziert nach betäubender Person (1-14) und Betrieb (A-E). Der Summen Score ergibt sich aus den Scores der acht Prozessintervalle (Auswurf bis 4. Minute der Entblutung), die jeweils die Gesamtsumme der Scorewerte aller beobachteten Bewegungen in diesem Intervall darstellen. Jeder Bewegung wurde entsprechend ihrer Intensität ein Score zwischen 0,5 und 3 zugeordnet. 67

Abbildung 12. Lagemaße des Summen Scores von hornlosen Rindern (0) links und behornen Rindern (1) rechts. Der Summen Score ergibt sich aus den Scores der acht Prozessintervalle (Auswurf bis 4. Minute der Entblutung), die jeweils die Gesamtsumme der Scorewerte aller beobachteten Bewegungen in diesem Intervall darstellen. Jeder

Bewegung wurde entsprechend ihrer Intensität ein Score zwischen 0,5 und 3 zugeordnet.	69
Abbildung 13. Verteilung des Anteils der verschiedenen Positionsabweichungen (in cm) vom optimalen Schussansatz (1 cm über einem Kreuzungspunkt zweier gedachter Linien zwischen Augenmitte und Mitte des gegenüberliegenden Hornansatzes) (n= 278) in der gesamten Untersuchungsgruppe (N= 2.911) auf die verschiedenen Richtungen (aus der Perspektive des Rindes: 2, 3, 4 Uhr \triangleq Abweichung nach links; 5, 6, 7 Uhr \triangleq Abweichung nach rostral; 8, 9, 10 Uhr \triangleq Abweichung nach rechts; 11,12, 1 Uhr \triangleq Abweichung nach caudal).....	71
Abbildung 14. Relativer Anteil an Rindern mit guter (ok), fraglicher (fraglich) und nicht ausreichender (nicht ok) Betäubungseffektivität (N= 2.911) differenziert nach Positionsabweichung in cm vom optimalen Schussansatz (1 cm über einem Kreuzungspunkt zweier gedachter Linien zwischen Augenmitte und Mitte des gegenüberliegenden Hornansatzes).	73
Abbildung 15. Verteilung des Anteils der gemessenen Abweichungen vom optimalen Einschusswinkel (senkrecht zur Stirn) innerhalb der drei Produktionsgruppen (B= Bulle, F= Färse, K= Kuh).	74
Abbildung 16. relativer Anteil an Rinden mit Winkelabweichungen innerhalb der Tiere mit guter (ok), fraglicher (fraglich) und nicht ausreichender (nicht ok) Betäubungseffektivität.	76
Abbildung 17. Austrittslänge des Bolzens (in mm) der verschiedenen Gerätetypen und -variationen (verwendete Ladungsstärke bzw. eingestellter Druck) für die Einzelmessungen (1 bis 5) mittels Hochgeschwindigkeitskamera.....	79
Abbildung 18. Verhältnis von kinetischer Energie zur Bolzengeschwindigkeit für die untersuchten Varianten von pneumatischen (blau) und landungsbetriebenen (orange)	

Schussapparaten. Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte aus 5 Einzelmessungen je Gerätevariation..... 88

11.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Verteilung der Rinder nach Produktionsgruppe (Bulle, Färsen Kühe) auf die unterschiedlichen Rassen innerhalb der Stichprobe (N= 2.911)..... 29

Tabelle 2. Verteilung der untersuchten Rinder aufgeteilt nach Produktionsgruppe (Bulle, Färse, Kuh) auf die Betriebe (A-E). 63

Tabelle 3. Verteilung der insgesamt untersuchten Rinder (N= 2.891) auf die unterschiedlichen betäubenden Personen (1-14) in den beteiligten Schlachtbetrieben (A-E). 65

Tabelle 4. Verteilung der untersuchten Rinder auf die saisonalen Untersuchungszeiträume, differenziert nach Produktionsgruppe. 68

Tabelle 5. Verteilung des Anteils der verschiedenen Positionsabweichungen (in cm) vom optimalen Schussansatz (1 cm über einem Kreuzungspunkt zweier gedachter Linien zwischen Augenmitte und Mitte des gegenüberliegenden Hornansatzes) innerhalb der verschiedenen Produktionsgruppen (Bullen, Färsen, Kühen). 71

Tabelle 6. Verteilung des Anteils der verschiedenen Positionsabweichungen vom optimalen Schussansatz (1 cm über einem Kreuzungspunkt zweier gedachter Linien zwischen Augenmitte und Mitte des gegenüberliegenden Hornansatzes) (in cm) auf die verschiedenen betäubenden Personen. 72

Tabelle 7. Verteilung der gemessenen Abweichungsrichtung vom optimalen Einschusswinkel (senkrecht zu Stirn) bei den untersuchten Rindern innerhalb der verschiedenen Betriebe (A-E)..... 74

Tabelle 8. Ausmaß der Winkelabweichungen (in °) des Betäubungsschusses differenziert nach Betrieb (A-E) und betäubender Person (1-14).....	75
Tabelle 9. Übersicht der untersuchten Gerätetypen und verwendeten Ladungsstärken bzw. dem eingestellten Luftdruck für die jeweils durchgeführte Prüfmethode.....	77
Tabelle 10. Vergleich der Mittelwerte (3 bis 5 Messungen je Gerätevariation) für die Bolzenaustrittslänge der untersuchten Gerätetypen und -variationen beider Messmethoden (Methode 1: Blumensteckschaum, Methode 2: Hochgeschwindigkeitskamera) (nicht repräsentative Messung).	80
Tabelle 11. Vergleich der Mittelwerte (3 bis 5 Messungen je Gerätevariation) der Bolzengeschwindigkeit der untersuchten Gerätetypen und -variationen beider Messmethoden (Methode 1: Stun Tester-Methode, Methode 2: Hochgeschwindigkeitskamera) (nicht repräsentative Messung).....	83
Tabelle 12. Vergleich der Mittelwerte (3 bis 5 Messungen je Gerätevariation) der kinetischen Energie des Bolzens der untersuchten Gerätetypen und -variationen beider Messmethoden (Methode 1: Stun Tester-Methode, Methode 2: Hochgeschwindigkeitskamera) (nicht repräsentative Messung).....	86

11.3 Abkürzungsverzeichnis

A	Ampere
AAN	American Acedemy of Neurology
Abb.	Abbildung
AVMA	American Veterinary Medical Association
BGBI	Bundesgesetzblatt
BGR	Berufsgenossenschaftliche Regeln
BGZ	Berufsgenossenschaftliche Zentrale für Sicherheit und Gesundheit
bsi	Beratungs- und Schulungsinstitut für Tierschutz bei Transport und Schlachtung
Bsp.	Beispiel
bzw.	Beziehungsweise
al.	alter, lat. für andere
ANOVA	Analysis of Variance
ArbSchG	Arbeitsschutzgesetz
BSE	Bovine spongiforme Enzephalopathie
CHA	Charolais
cm	Zentimeter
DA	Deutsche Angus
DE	Deutschland
EEG	Elektroenzephalographie
EFSA	European Food Safety Authority, engl. für Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit
EG	Europäische Gemeinschaft
E_{kin}	Kinetische Energie
E_{norm}	Energiewert der Kartusche
et	lat. für und
Fa.	Firma
FL	Fleckvieh
g	Gramm
GAL	Galloway
ggr.	Geringgradig
h	Stunde
HE	Hereford
HSA	Humane Slaughter Association

IASP	International Association for the Study of Pain
J	Joule
k.A.	Keine Angabe
kg	Kilogramm
LIM	Limousin
m	Masse
m	Meter
µs	Mikrosekunden
Max.	Maximum
mg	Milligramm
min	Minute
Min.	Minimum
mm	Millimeter
m/s	Meter pro Sekunde
n	Teilmenge
N	Gesamtmenge
n.g.	Nicht gemessen
Nr.	Nummer
p	Irrtumswahrscheinlichkeit
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
RBT	Holstein-Rotbunt
s	Sekunde
SBT	Holstein-Schwarzbunt
SON	Sonstige Kreuzungen
Tab.	Tabelle
TierSchG	Tierschutzgesetz
TierSchIV	Tierschutz-Schlachtverordnung
TVT	Tierärztliche Vereinigung für Tierschutz
UDDA	Uniform Determination of Death Act
v	Geschwindigkeit
V	Volt
VO	Verordnung
XFF	Kreuzung Fleischrind x Fleischrind
XFM	Kreuzung Fleischrind x Milchrind
XMM	Kreuzung Milchrind x Milchrind
%	Prozent
≥	Größer gleich

\leq	Kleiner gleich
$>$	Größer als
$<$	Kleiner als

12 Danksagung

Zunächst möchte ich Prof. Dr. Helen Louton und Prof. Dr. Dr. Michael Erhard meinen herzlichen Dank aussprechen, dass sie meine Dissertation am Lehrstuhl für Tierschutz, Verhaltenskunde, Tierhygiene und Tierhaltung der LMU und an der Professur für Tiergesundheit und Tierschutz der Universität Rostock ermöglicht haben. Für die Unterstützung bei der Umsetzung möchte ich mich herzlich bei Ihnen beiden bedanken.

Besonders möchte ich mich bei Prof. Dr. Helen Louton für die Verbesserung der Manuskripte, ihre engagierte Betreuung und die wertvollen und konstruktiven Anmerkungen bedanken.

Ebenso gebührt mein außerordentlicher Dank Dr. Karen von Holleben und Dr. Martin von Wenzlawowicz vom bsi Schwarzenbek für die Ermöglichung dieser Dissertation, die intensive Betreuung, die Planung dieses Projektes und insbesondere ihre wertvolle und unermüdliche Unterstützung. Ihre fachlichen Anregungen haben meine Arbeit nachhaltig beeinflusst und geprägt. Besonders möchte ich Dr. Karen von Holleben danken, die zahlreichen Nächte und Wochenenden diesem Projekt und meiner Arbeit gewidmet hat. Ein besonderer Dank geht auch an meinen Kollegen Dr. Karen von Holleben, Dr. Martin von Wenzlawowicz, Dr. Winfried Dyrba und Dr. Antje Köster für ihre tatkräftige Hilfe bei der Datenerhebung.

Ebenso möchte ich den beteiligten Schlachtbetrieben für ihr Vertrauen und ihre großartige Zusammenarbeit danken, die die Durchführung dieses Projekts erst möglich gemacht haben.

Ein herzliches Dankeschön gilt auch den Mitarbeitern der Schlachtbetriebe, insbesondere Herrn Uwe Bitter, Herrn Conrad Kliem, Dr. Veronika Weber, Herrn Anatolij Tews, Frau Dr. Yvonne Schneider, Herrn Dr. Gerald Otto, Frau Marielena Krieger und Herrn Olaf Fensterseifer, für ihre Unterstützung bei der Datenerhebung.

Des weiteren möchte ich den Firmen Jarvis®, EFA und Turbocut Jopp GmbH für die Bereitstellung ihrer Geräte danken, insbesondere Herrn Gülzow für seine Unterstützung bei den Messungen. Ein Dank geht auch an die PTB Braunschweig für ihre fachliche Beratung und gute Zusammenarbeit bei der Vermessung der Bolzenschussgeräte.

Dr. Michael Judas vom Max Rubner-Institut (MRI) danke ich für seine Unterstützung bei der statistischen Auswertung und Interpretation der Daten.

Zudem möchte ich all meinen Tieren danken, die mir in dieser Zeit Ablenkung verschafft haben und mir verdeutlicht haben, was wahre Zufriedenheit bedeutet und mich gelehrt haben, die kleinen Freuden zu schätzen.

Abschließend möchte ich meiner Familie von Herzen danken, die mich zu jeder Zeit moralisch unterstützt hat. Ihr Verständnis und ihre Motivation haben mir auch in schweren Phasen stets Kraft geschenkt und mich bis zu diesem Punkt geführt.

Ein Projekt gefördert durch das Bundeinstitut für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL).