

Bestimmung der sicherheitstechnischen Kennwerte für Futtermittelmischungen und deren Rohwaren



Madlen Schoenherr	(Analysen und Bericht, Staublabor)
Meike Hoffrichter-Bohle	(Bericht, Zentrallabor Explosionsschutz)
Caroline Skoppek	(Probenahme, Messtelle Gefahrstoffe)
Michael Metzner u. Matthias Schmitt	(Analysen, Staublabor)

Hannover, den 27.06.2024

Vorwort

Dankend zu erwähnen ist Frau Alexandra Kirchner, Fa. VERA VIS GmbH, die den Kontakt zu den beteiligten Betrieben hergestellt hat, bei der Auswahl der Futtermittel behilflich war und vor Ort die Probenahme begleitete.

Allen Betrieben, die Futtermittel für diese Untersuchungen zur Verfügung gestellt haben, gilt unser ausdrücklicher Dank für deren Bereitschaft zur Teilnahme, dem Versand von Futtermittel bzw. für die Unterstützung bei der zeitaufwendigen Probenahme.

Inhalt

1	Zielsetzung	4
2	Untersuchungsprogramm	4
3	Beschreibung der Futtermittel	4
4	Beschreibung der Analyseverfahren und Untersuchungsergebnisse.....	5
4.1	Bestimmung der Korngrößenverteilung der organischen Bestandteile der Futtermittel.....	5
4.1.1	Korngrößenverteilung im Urmuster (KG in μm) nach DIN 66165.....	5
4.1.2	Bestimmung des Glühverlusts in Anlehnung an DIN EN 15935	5
4.1.3	Ergebnisse der Bestimmung der Korngrößenverteilung	6
4.2	Bestimmung der Feuchtigkeit und der Staubungsneigung (Staubzahl)	9
4.2.1	Messverfahren zur Bestimmung der Feuchte (Urmuster); Gewicht in % Wasserverlust.....	9
4.2.2	Bestimmung der Staubungsneigung "Dust View II, Palas GmbH"	10
4.2.3	Ergebnisse der Bestimmung der Feuchte und des Staubungsverhaltens	11
4.3	Explosionsfähigkeit in der Hartmannapparatur – EN ISO 80079-20-2.....	14
4.3.1	Ergebnisse der Untersuchung in der Hartmann-Apparatur:.....	15
4.4	Bestimmung der Mindestzündenergie mit Induktivität (MZE in mJ): EN ISO 80079-20-2	17
4.4.1	Ergebnisse der Bestimmung der Mindestzündenergie m. Induktivität:	17
4.5	Bestimmung der Brennzahl (BZ): DIN 17077 (2018).....	17
4.5.1	Ergebnisse der Bestimmung der Brennzahl.....	18
4.6	Bestimmung der Mindestzündtemperatur	18
4.6.1	Mindestzündtemperatur einer Staubschicht (Glimmtemperatur GT in $^{\circ}\text{C}$): EN ISO 80079-20-2	18
4.6.2	Mindestzündtemperatur einer Staubwolke (Zündtemperatur ZT in $^{\circ}\text{C}$): EN ISO 80079-20-2	18
4.6.3	Ergebnisse der Bestimmung der Mindestzündtemperaturen:.....	18
4.7	Explosionsversuche in der geschlossenen Apparatur – 20l-Kugel (DIN EN 14034) 19	
4.7.1	max. Explosionsüberdruck (p_{max} in bar): DIN EN 14034-1.....	19
4.7.2	Staubexplosionskonstante (K_{ST} -Wert in $\text{bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$): DIN EN 14034-2.....	19
4.7.3	Ergebnisse der Explosionsversuche	19
5	Zusammenfassung der Ergebnisse	20
6	Anhang.....	22
6.1	Partikelgrößenverteilung ohne Abzug der anorganischen Anteile (Urmuster) der Futtermittel und deren Glühverlust (Beprobung Februar 2024)	22
6.2	Partikelgrößenverteilung mit Abzug der anorganischen Anteile (Annahme: gemessener anorganischer Anteile der Fraktion < 250 μm findet sich auch in den Fraktionen < 125 μm , < 63 μm und < 32 μm) (Beprobung Februar 2024)	23
6.3	Partikelgrößenverteilung der der BGN zugesandten anonymen Futtermittelmischungen vom Mai 2023 ohne Abzug der anorganischen Anteile (Urmuster)	24
6.4	Partikelgrößenverteilung der Rohwaren (erhalten Februar - Mai 2024).....	25
6.5	Partikelgrößenverteilung von Rohwaren aus der Staub-Datenbank der BGN	26
6.6	Feuchte der Futtermischungen nach dem Mischer und nach dem Elevator vor der Einlagerung ins Silo in Abhängigkeit der Messverfahren (erhalten Februar - Mai 2024).....	27
6.7	Sicherheitstechnische Kenndaten Zündtemperatur (ZT), Glimmtemperatur (GT), Mindestzündenergie (MZE), Brennzahl (BZ), max. Explosionsdruck (p_{max}), Staubexplosionskonstante K_{ST} , Reaktion im Hartmannrohr der untersuchten Futtermittelmischungen und Rohwaren.....	29
6.8	Feuchte der Futtermischungen nach dem Mischer und nach dem Elevator vor der Einlagerung ins Silo in Abhängigkeit der Messverfahren.....	31

1 Zielsetzung

Futtermittel bestehen aus diversen Einzelkomponenten. Bei den Futtermittelmischungen handelt es sich um grobe Schüttgüter, die deutliche Anteile an explosionsfähigen Partikeln (Fraktion < 500 µm) enthalten.

Für diverse Einzelkomponenten der Futtermittel sind die sicherheitstechnischen Kenndaten bekannt und in den einschlägigen Datenbanken zu finden. Für Futtermittelmischungen gibt es jedoch nur wenige Erkenntnisse.

Ermittelt wurden die Korngrößenverteilung, die Feuchte und der Glührückstand sowie die sicherheitstechnischen Kenndaten wie die Brennzahl, die Zünd- und Glimmtemperatur, die Mindestzündenergie, der max. Explosionsdruck p_{max} und der Staubexplosionskonstante K_{ST} -Wert. Die Kenndaten wurden stichprobenartig sowohl im Anlieferungszustand (sogenanntes Urmuster) als auch im genormten Labormuster, in diesem Fall die Partikelfraktion < 250 µm, ermittelt.

2 Untersuchungsprogramm

Untersucht wurden Futtermittelmischungen für verschiedene Tiere wie Schwein, Rind, Broiler, Legehennen, Schaf, Pferd. Die sicherheitstechnischen Kenndaten einzelner Rohwaren wie Weizenfuttermehl, Brotmehl, Maisfeinschrot, Rapsexpeller, Sonnenblumen- und Sojaschrot finden sich ebenfalls in diesem Bericht.

Durch die BGN fand im Februar 2024 die Probenahme der neun Futtermittelmischungen in drei ausgewählten Betrieben statt.

Die Futtermittelproben wurden aus dem Mischer oder dessen Nachbehälter (nach der Gemischt-Vermahlung der Rohwaren) sowie vor der Einlagerung in die Silozellen (nach dem Transport mit dem Elevator) entnommen. Bei allen Betrieben erfolgte die Zugabe von Flüssigkeit (z. B. Fett, Wasser, Melasse) in den Melassierer. Nur bei einem Betrieb wurde bereits Flüssigkeit in den vorgeschalteten Mischer gegeben.

Die Untersuchungsergebnisse neun weiterer Futtermittel unbekannter Herkunft, die vom Betrieb gezogen und der BGN im Mai 2023 zugeschickt wurden, sind ebenfalls in diesem Bericht aufgenommen. Es wurde angegeben, dass die Probenahme zwischen dem Mischer und der Einlagerung ins Silo, auf jeden Fall nach entsprechender Flüssigkeitszugabe, erfolgte. Die Sorten dieser Futtermittelmischungen sind nur partiell bekannt.

Die Rohwaren wurden der BGN von den Betrieben 2024 zugesandt.

3 Beschreibung der Futtermittel

Die untersuchten Fertigfuttermischungen bestanden aus vielen verschiedenen Rohwaren:

- Getreide und Leguminosen sowie deren Zerkleinerungsprodukten wie z.B. Roggen, Gerste, Weizen, Luzernenmehl, Mais, Erbsen
- Ölsaaten und deren Extraktionsschrote wie z.B. aus Soja, Raps, Sonnenblumen, etc.
- Nachprodukte wie Melasseschnitzel, Schlempe, Weizenkleber, etc.
- Zusatzstoffe wie Vitamine, Enzyme, Mineralstoffe, etc.
- Flüssige Komponenten wie Wasser, Öle, Fette, Melasse, etc.

Die Zusammensetzung der untersuchten Futtermittelmischungen variierte bei den Hauptkomponenten zwischen:

Getreide bis ca. 80 %
Kleie bis ca. 42 %
Schrote bis ca. 95 %
Mais bis ca. 30 %

Die Bandbreite der in den Betrieben eingesetzten Rohwaren ist sehr hoch. In jedem Betrieb findet sich eine Vielzahl an Rezepturen. Futtermittelmischungen werden häufig kundenspezifisch hergestellt.

4 Beschreibung der Analyseverfahren und Untersuchungsergebnisse

Da die Futtermittelmischungen aus verschiedenen Partikelfractionen bestehen, wurde bei der Probenahme in den Betrieben auf eine repräsentative Probenahme geachtet. Es wurden immer mindestens drei Einzelproben zu einer Sammelprobe zusammengefasst. Die Probenahmebehälter wurden maximal gefüllt und luftdicht verschlossen, um eine Veränderung der Feuchte während des Transports zum Labor zu verhindern.

Die Laboruntersuchungen wurden sowohl im Anlieferungszustand, d.h. im sogenannten Urmuster als auch im genormten Muster (Partikelfraktion < 250 µm) durchgeführt.

4.1 Bestimmung der Korngrößenverteilung der organischen Bestandteile der Futtermittel

Futtermittelmischungen enthalten überwiegend organische Stoffe. Anorganische Zusätze wie Kalk, Kochsalz, etc. werden aber auch zugesetzt. Diese Zusätze können Partikelgrößen < 500 µm aufweisen. Während organische Stoffe mit Partikelgrößen < 500 µm als explosionsfähig einzustufen sind, trifft dies auf anorganische Stoffe wie sie in der Futtermittelindustrie verwendet werden, nicht zu. Bei der Beurteilung der Korngrößenverteilung im Hinblick auf die Explosionsfähigkeit darf der anorganische Anteil in der Futtermittelmischung nicht betrachtet werden. Aus diesem Grund wurde der Glühverlust der explosionsrelevanten Fraktion < 250 µm ermittelt, aus dem der Anteil an anorganischen Stoffen berechnet werden kann.

4.1.1 Korngrößenverteilung im Urmuster (KG in µm) nach DIN 66165

Zunächst wurden von allen Produkten Korngrößenverteilungen mittels Siebanalyse im Luftstrahlsieb (Alpine A200 LS) erstellt. Da sich die Partikel leicht entmischen ließen, wurden die Proben im Labor von Hand bestmöglich durchmischt und wo es möglich war, anschließend über einen Probenteiler geleitet, um eine Teilprobe zu erzeugen.

4.1.2 Bestimmung des Glühverlusts in Anlehnung an DIN EN 15935

Der Glühverlust ist der Massenanteil, der nach Verglühen einer getrockneten Probe bis zur Massenkonstanz bei einer festgelegten Temperatur von 550 °C verbleibt. Das Vorgehen bei der Bestimmung wird in DIN 15935 beschrieben.

Die Proben wurden für diese Bestimmung auf <250 µm abgesiebt und getrocknet.

Sie wurden in einen Tiegel eingewogen (ca. 2 g) und anschließend in einen kalten Muffelofen gestellt. Nach Einschalten des Ofens, heizte dieser auf 550 °C auf. Die Temperatur wurde mindestens 2 h beibehalten. Bei der Entnahme der verglühten Probe waren keine schwarzen Partikel mehr zu erkennen.

Der noch sehr heiße Tiegel mit dem Glührückstand wurde für einige Minuten auf eine Metallplatte gestellt und anschließend der noch warme Tiegel in einen Exsikkator überführt.

Sobald die Umgebungstemperatur erreicht war, wurde der Tiegel mit dem Glührückstand auf 1 mg genau gewogen.

Der Glühverlust wird aus der Differenz der Massen vor und nach dem Glühvorgang errechnet.

Der Glühverlust $wLOI$ wurde nach der Formel:

$$wLOI = (mc - md / mc - ma) \times 100$$

berechnet.

Dabei ist:

wLOI der Glühverlust der Trockenmasse einer festen Probe, in Prozent (%);

ma die Masse des leeren Tiegels, in Gramm (g);

mc die Masse des Tiegels mit der vorbereiteten Probe, in Gramm (g);

md die Masse des Tiegels mit der geglühten Probe, in Gramm (g).

Die gesiebte Probe (Fraktion < 250 μm) wurde bei 105°C für mindestens 1 h getrocknet. Anschließend wurde sie im Muffelofen bei 550°C für 2 h geglüht.

4.1.3 Ergebnisse der Bestimmung der Korngrößenverteilung

Je nach **Futtermittelmischung** (außer für Legehennen) bestehen ca. 30 – 62 % der Gesamtfraktion aus Partikeln < 500 μm und ca. 20 – 40% aus Partikeln < 250 μm . Das 50 % Perzentil der Futtermittelmischungen lag zwischen 400 μm und 1.000 μm .

Das Futter für **Legehennen** ist recht grob und hat den höchsten Medianwert um 1.500 μm . Es enthält ca. 7 -15 % Partikel < 500 μm und ca. 20 – 40% Partikeln < 250 μm .

Futtermittelmischungen, deren Rohwaren **nur über den Walzenstuhl**, ohne Hammermühle, zerkleinert werden, wie z.B. das Schweinemastfutter (Probennr. 2333), können ebenfalls explosionsfähige Partikel < 250 μm von ca. 20 % enthalten.

Im Anhang **Tabelle 6.1** finden sich die **Partikelgrößenverteilung** aller im Februar 2024 untersuchten Futtermittelmischungen.

Die Futtermittelmischungen enthalten entsprechend der Analyse des **Glühverlustes in der Fraktion < 250 μm zwischen 5- 20 % anorganische Zusatzstoffe**. Legehennenfutter weist mit 15 – 20% den höchsten Anteil auf. Die anderen Futtermittelmischungen liegen zwischen 5 – 10% Anteil in der explosionsfähigen Fraktion < 250 μm . Die Werte korrelieren mit den groben Angaben der Betriebe zum Kalk und Salzgehalt, erscheinen aber relativ hoch. Da die detaillierten Zusammensetzungen der Futtermittelmischung der BGN nicht vorliegen, lassen sich die Ergebnisse nicht validieren. Die Laborergebnisse der Bestimmung des **Glühverlustes** sind ebenfalls in der **Tabelle 6.1** des Anhangs aufgenommen.

Bezogen auf die prozentuale Partikelverteilung der gesamten Futtermittelmischung wirkt sich der geringe Prozentsatz an anorganischen Stoffen nur sehr geringfügig aus

Wird der anorganische Anteil der Fraktion < 250 μm bei der Partikelgrößenverteilung berücksichtigt, verschiebt sich der explosionsfähige Anteil < 250 μm an der Gesamtfraktion nur geringfügig nach unten.

Beispiel Broiler:

Bei einer Masse von z. B. 2.000 g sind 18,3 % < 250 μm , d. h. 366 g. Von den 366 g sind 5 % anorganisch, d.h. 18,3 g. in den 2.000 g Futtermittel sind somit nur 348 g organische Partikel < 250 μm enthalten. Prozentual auf die 2.000 g sind dies dann immer noch 17,4 %

Partikel < 250 μm (Annahme: gemessener anorganischer Anteile der Fraktion < 250 μm findet sich auch in den Fraktionen < 125 μm , < 63 μm und < 32 μm).

Der Anteil an explosionsfähigen Partikeln < 250 μm sinkt dadurch lediglich auf 20 – 35 %. Ausgenommen ist hiervon lediglich das Legehennenfutter, das aufgrund seiner groben Struktur und des relativ hohen Anteils an anorganischen Komponenten lediglich 6 – 12 % explosionsfähige Partikel < 250 μm hat.

Tabelle 6.2 des Anhangs enthält die Partikelgrößenverteilungen der **Futtermittelmischungen mit Abzug der anorganischen Anteile**.

Die **Partikelgrößenverteilung** der Futtermittelmischungen, die der BGN im **Mai 2023** ohne Angabe des herstellenden Betriebes zugesandt wurden, ist im Anhang in **Tabelle 6.3** aufgenommen. Da für diese Proben der Glühverlust nicht bestimmt wurde, ist der anorganische Anteil (Urmuster) enthalten.

Einige **Rohwaren** sind sehr grob und haben einen vernachlässigbaren Anteil an explosionsfähigen Partikeln wie z. B. das Sonnenblumenschrot, das als Pelletware im Betrieb verwendet wird.

Es werden aber auch Rohwaren eingesetzt oder selber hergestellt wie z.B. das Weizenfuttermehl, deren 50 % Perzentil zwischen 200 und 300 μm liegen und somit einen hohen Anteil an explosionsfähigen Partikeln enthalten. Die **Partikelgrößenverteilung** der untersuchten **Rohwaren** findet sich in **Tabelle 6.4** und der bereits in der BGN-Datenbank früher erfassten Rohwaren in **Tabelle 6.5** des Anhangs.

In nachfolgender **Abbildung 1** ist die Partikelgrößenverteilung aller untersuchten Futtermittelmischungen zu sehen. Bei den ersten 9 Futtermittelmischungen (linke Seite der Graphen bis Trennstrich) wurde der anorganische nicht explosionsfähige Anteil herausgerechnet. Dies sind die im Februar 2024 beprobten Futtermittelmischungen. Dann folgen die anonym zugesandten Futtermittelmischungen von 2023. Das untersuchte Rapsextraktionsschrot enthält keine Beimischungen, so dass es die gleichen Eigenschaften wie Rohware aufweist.

In der nachfolgenden **Abbildung 2** ist die Partikelgrößenverteilung aller 2024 untersuchten Rohwaren sowie der bereits in der BGN-Datenbank früher erfassten Rohwaren enthalten.

Dabei fällt auf, dass einige Rohwaren wie z. B. Sojaschrot und Weizenkleie in der Partikelgrößenverteilung sehr unterschiedlich sein können.

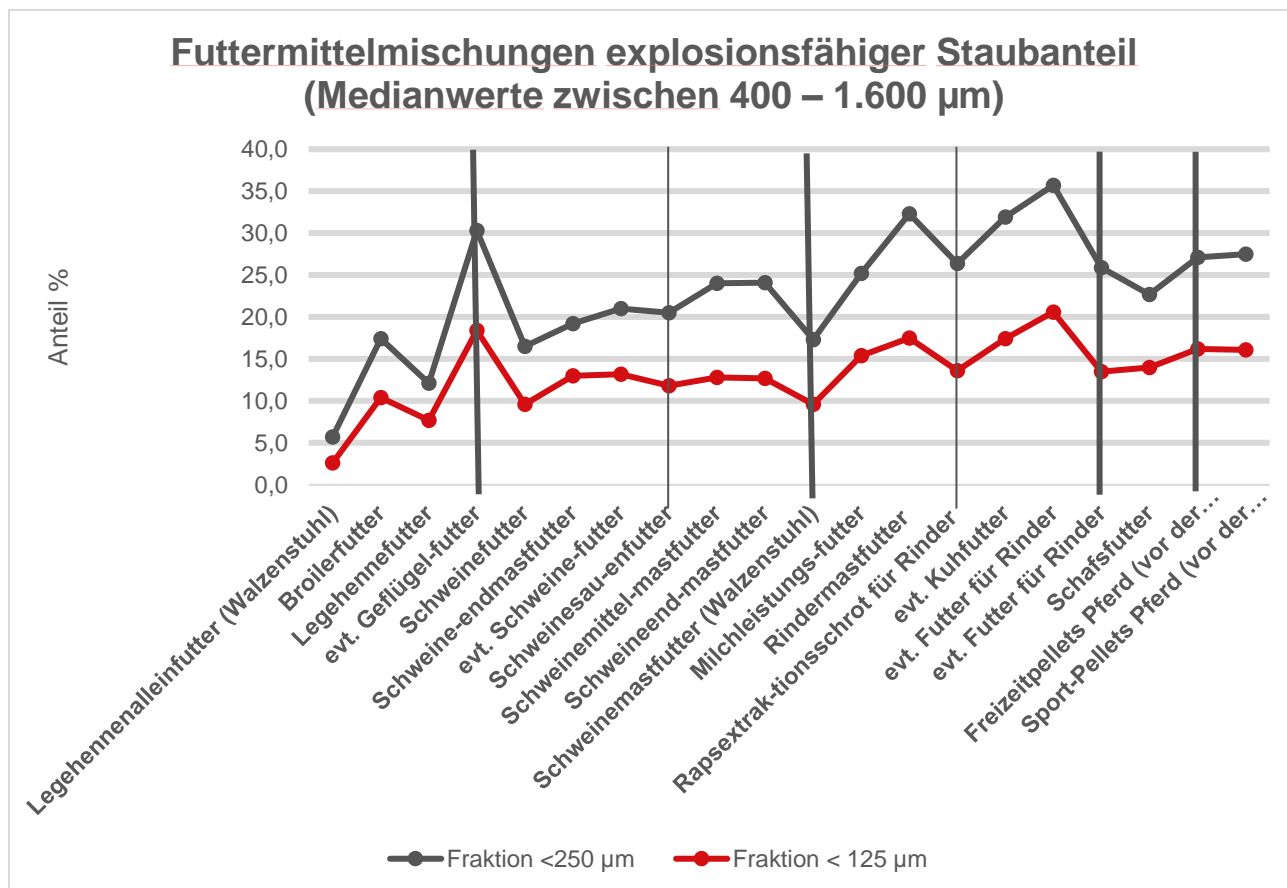


Abbildung 1: Anteile an explosionsfähigen Staub in verschiedenen Futtermittelmischungen

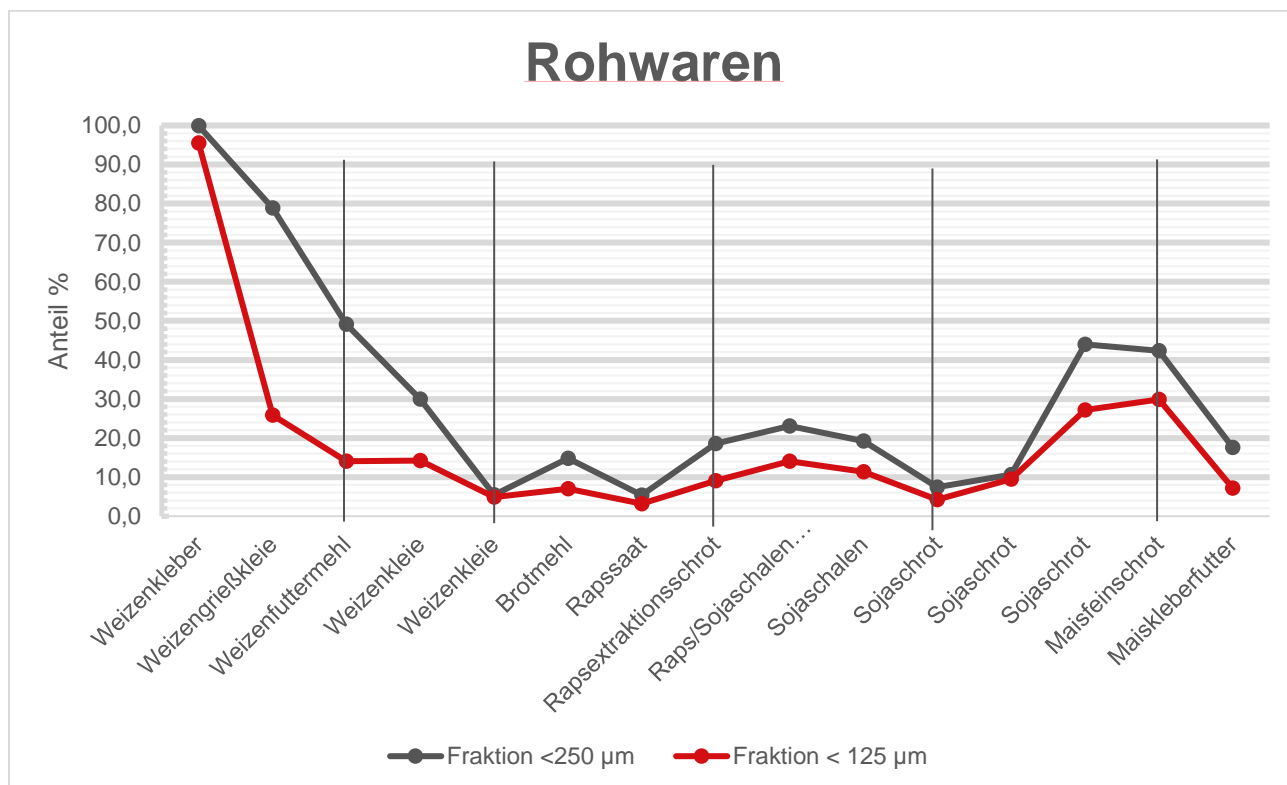


Abbildung 2: Anteile an explosionsfähigen Staub in verschiedenen Rohwaren

4.2 Bestimmung der Feuchtigkeit und der Staubungsneigung (Staubzahl)

Futtermittelmischungen werden häufig im Mischer oder Melassierer Flüssigkeiten wie Wasser, Öle, Melasse, etc. zugesetzt. Um den Einfluss der Flüssigkeitszugabe auf das Staubungsverhalten der Futtermittelmischungen abzuschätzen, wurde im Labor deren Feuchtigkeit und Staubungsverhalten ermittelt.

Die im Labor gemessene Feuchte erfasst nur die wasserhaltigen Flüssigkeiten, da die Verdunstungstemperatur der Öle wesentlich höher liegt.

Das Staubungsverhalten der Futtermittelmischungen wurde mit dem Staubungsverhalten von **Weizenmehl Typ 550** verglichen. Dieses Mehl wird standardmäßig für Explosionsversuche auf der Versuchsanlage in Kappelrodeck im Rahmen von Forschungsaufgaben eingesetzt, z. B. beim Projekt „Konstruktiver Explosionsschutz von Becherelevatoren“. Bei Stoffen, die eine ähnliche Staubzahl wie dieses Mehl haben, ist davon auszugehen, dass sich explosionsfähige Staub-/Luftgemische durch Aufwirbelungen bilden können.

4.2.1 Messverfahren zur Bestimmung der Feuchte (Urmuster); Gewicht in % Wasserverlust

Bei der Probenahme der Futtermittelmischungen 2309 – 2317 wurden die Feuchten sowohl mit dem jeweils **betriebseigenen Feuchteanalysator** der Fa. Kern bzw. Sartorius (Schnell-trocknungswaage, 120°C) als auch mit dem **Messgerät Fa. OCS.tec F07** der BGN (Eintauchen von Metallstäben in die Probe, Messprinzip Widerstandsmessung) bestimmt. Bei beiden Bestimmungsmethoden hat die oberflächlich auf dem Produkt befindliche Feuchtigkeit einen größeren Einfluss auf das Messergebnis als das im Produkt gebundene Wasser. Trotzdem sind die Messwerte nur bedingt vergleichbar, da das Messprinzip ein anderes ist. Die Messergebnisse mit dem Gerät der Fa. OCS.tec sind in diesem Untersuchungsbericht nicht mit aufgenommen. Die vom Hersteller hinterlegten Kennlinien waren bestimmten Produkten zugeordnet. Je nach gewähltem Produkt ergaben sich andere Messwerte. Die Messergebnisse machen deshalb nur bedingt einen validen Eindruck. Es war bei diesem Gerät leider nicht möglich, eine Kalibrierkurve (Kennlinie) für die Futtermittelmischungen zu erstellen.

Ziel der Bestimmung der Feuchte im Betrieb war in erster Linie zu ermitteln, ob während des Transports und im Labor Feuchte durch Verdunstung verloren geht und dadurch die sicherheitstechnischen Kenndaten verändert werden. Insofern ist der Vergleich der Feuchten gemessen vor Ort mit den Feuchten gemessen im Labor bei gleichem Messverfahren entscheidend und nicht der absolute Messwert an sich. Die jeweiligen Messwerte sind abhängig von der Temperatur und Dauer mit der getrocknet wird.

Um möglichst eine Veränderung der Feuchte während des Transports und im Labor zu minimieren, wurden die Proben in luftdichten Behältern aufbewahrt.

Im Labor wurde die Feuchte der Proben im **Trockenschrank**, mit dem **Feuchteanalysator MA100 der Fa. Sartorius** und einem **grain moisture meter** (Stabsonde, vergleichbar mit Messgerät Fa. OCS.tec F07) ermittelt.

Um eine Veränderung der Feuchte der Proben auch über einen längeren Zeitraum auszuschließen, wurde stichprobenartig nach ca. 2 Monaten (Ende April) die Feuchte ausgewählter Proben mit dem Feuchteanalysator und dem grain moisture meter nachgemessen.

4.2.1.1 Feuchtebestimmung im Trockenschrank nach DIN EN ISO 18134-2

Ca. 5 – 10 g der Probe wurden bei 105°C im Trockenschrank getrocknet. Die Auswaage der Proben nach 1 h, 24 h, 48 h u. 72 h ergab, dass sich das Gewicht nach 24 h nicht mehr veränderte. Im Protokoll sind deshalb die Werte für die Feuchte nach 24 h aufgenommen.

4.2.1.2 Feuchtebestimmung mit Feuchteanalysator MA100 der Fa. Sartorius

Im Feuchteanalysator wurden ebenfalls ca. 5 – 10 g der Probe bei 105°C getrocknet. Das Abbruchkriterium war auf 1mg pro 240 s eingestellt.

4.2.2 Bestimmung der Staubungsneigung "Dust View II, Palas GmbH"

Mit dem Staubmessgerät "Dust View II, Palas GmbH" wurde die Staubungsneigung ermittelt. Dieses Messgerät eignet sich sehr gut, um Stäube schnell und einfach bezüglich ihres Staubverhaltens zu vergleichen.

Bei der Untersuchung werden 30 g der Probe in den Aufgabetrichter gegeben. Zum Start des Versuchs öffnet sich eine Klappe und das Material fällt in den darunterliegenden Kasten. Der Staub wirbelte in der Kammer auf, wodurch der Laserstrahl, der durch die Kammer strahlt, geschwächt wurde. Während der Messung wird die Abschwächung des Lasers erfasst und als Staubwert zwischen 0 (keine Abschwächung) und 100 (vollständige Abschattung) ausgegeben. Der Nullwert wird vor jeder Messung automatisch ohne Staub ermittelt. Die Messung erfolgt über einen Zeitraum von 40 s. Die Messungen eines Produktes wurden jeweils 3-mal wiederholt und der Mittelwert davon gebildet.

Die vom Gerät ausgegebene **Staubzahl** setzt sich aus dem maximal aufgetretenen Staubwert und dem Staubwert nach 30s nach Erreichen des maximalen Wertes zusammen.

Diese Staubzahl ist nicht vergleichbar mit der Staubungszahl nach VDI 2263 Blatt 9.

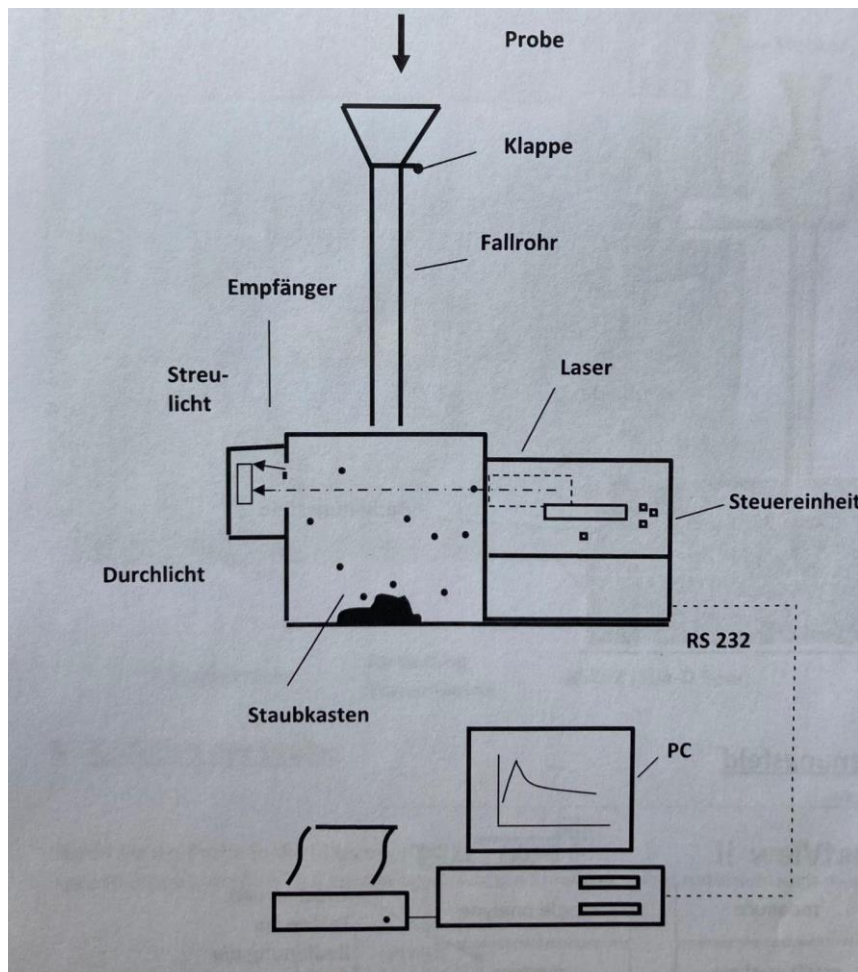


Abbildung 3: Prinzipskizze Dust View II, Palas GmbH

4.2.3 Ergebnisse der Bestimmung der Feuchte und des Staubungsverhaltens

Die im Feuchteanalysator der BGN ermittelten Feuchten stimmen sehr gut mit den im Trockenschrank ermittelten Feuchten überein, obwohl die Trocknungszeit, bei gleicher Temperatur und vergleichbarer Einwaage, stark abweichend ist.

Bei den Proben, die im Betrieb mit Feuchtigkeit beaufschlagt waren, wurden im Vergleich zu den Proben ohne Befeuchtung stets höhere Feuchte-Messwerte gefunden. Die Messwerte sind somit plausibel. Erkennbar ist, dass sich die Feuchte durch die Flüssigkeitszugabe nach den Labormessungen meist nur um 1 – 2 % erhöht. In den nachfolgenden **Abbildungen 4 und 5** lässt sich dieses Ergebnis gut nachvollziehen.

Der **Tabelle 6.6** im Anhang sind die Messergebnisse der Feuchte des Futtermittels nach dem Mischer und nach dem Elevator vor der Einlagerung ins Silo sowie der Rohwaren in Abhängigkeit des Messverfahrens (Feuchteanalysator Betrieb / Labor, Trockenschrank) zu entnehmen.

Die Feuchtegehalte ausgewählter Futtermittelmischungen ermittelt mit unterschiedlichen Messverfahren und zu unterschiedlichen Zeitpunkten (Februar 2024 und zum Abschluss der Untersuchungen Ende April 2024) sind in einer Abbildung im Anhang unter 6.8 dargestellt. Die Veränderung der Feuchte über die Zeit bewegt sich im Rahmen der Messgenauigkeit um die 0,5 %.

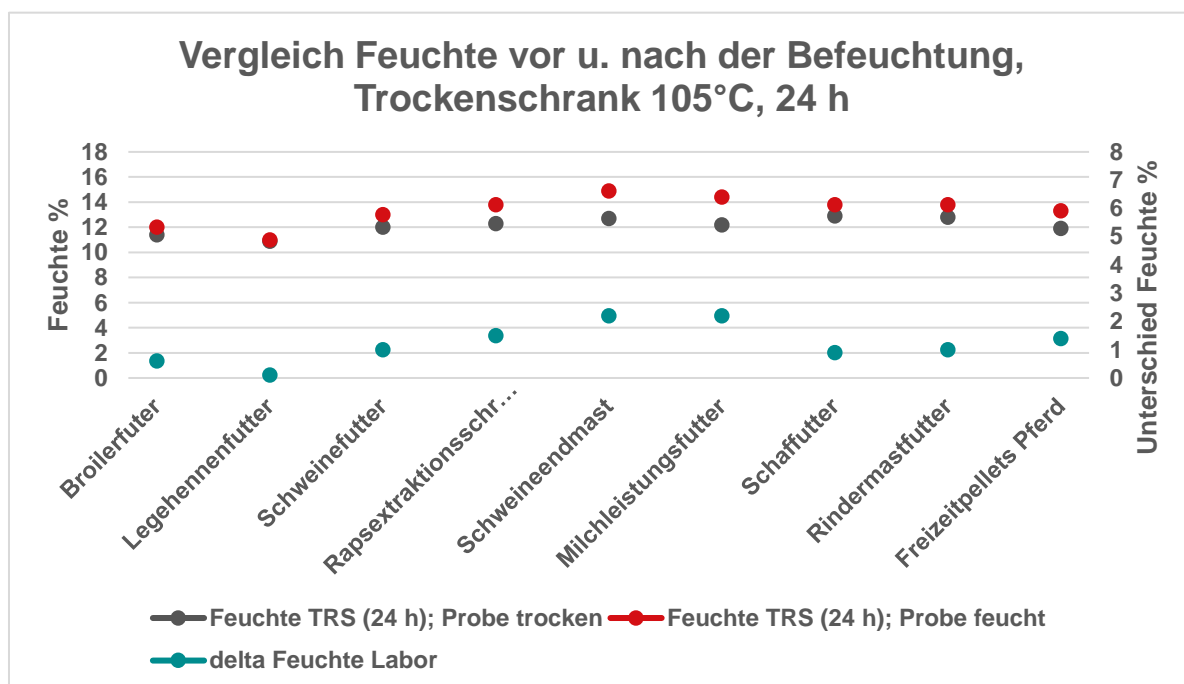


Abbildung 4: Vergleich der Feuchte der Futtermittelmischungen vor und nach der Befeuchtung bei der Bestimmung mittels Trockenschrank (105°C, 24 h)

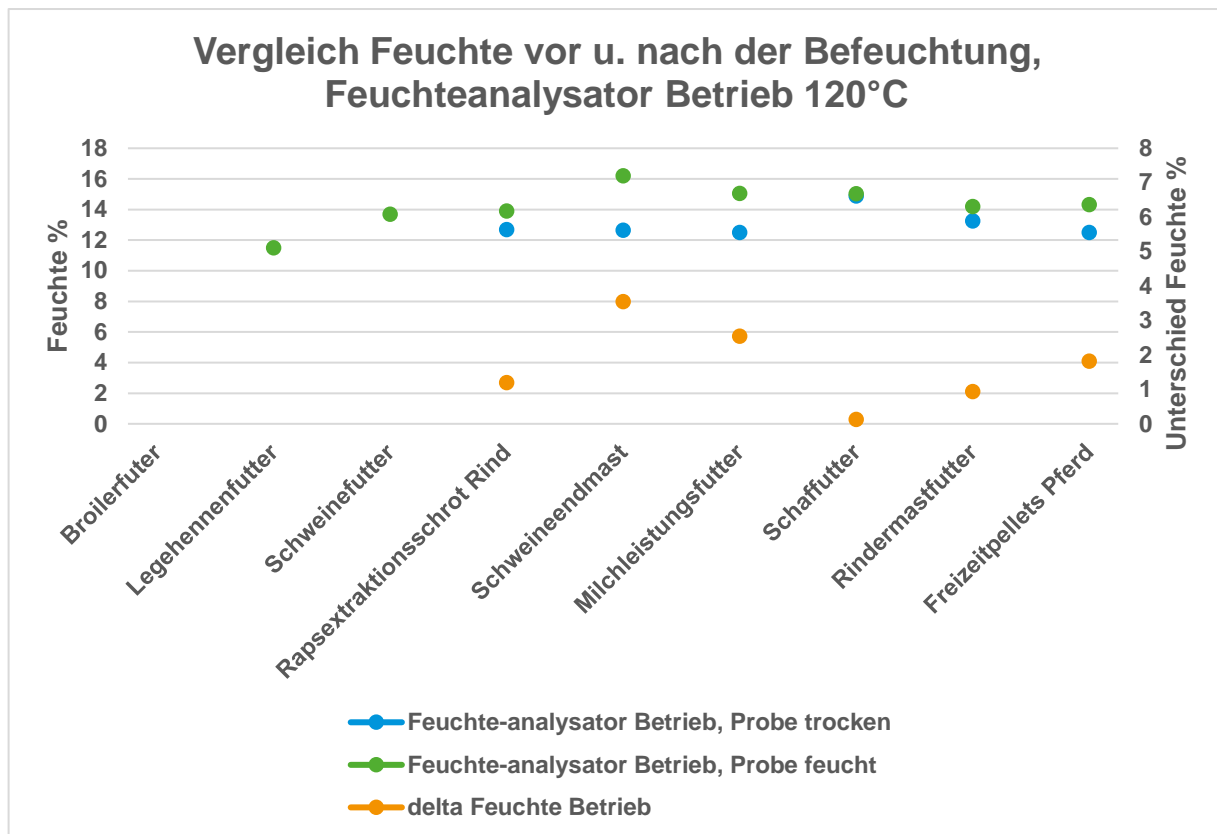


Abbildung 5: Vergleich der Feuchte der Futtermittelmischungen vor und nach der Befeuchtung bei der Bestimmung mittels Feuchteanalysator des Betriebs (120°C)

Beim **Rapsextraktionsschrot** wird nach Angabe des Betriebs nur 0,5 % Flüssigkeit zugesetzt. Trotzdem steigt die Feuchte um ca. 1,5 % im Vergleich zu der trockenen Probe.

Beim **Schweineendmastfutter** und beim **Milchleistungsfutter** wird nur ca. 1,5 – 2 % Flüssigkeit aufgegeben, die sich auch im Labor wiederfinden. Im Feuchteanalysator des Betriebs ergibt sich aber eine Erhöhung um 2,6 - 3,5 %.

Die geringen Änderungen der Feuchte bewegen sich, vermutlich durch die überschaubare Zugabemenge an Flüssigkeit, im Bereich der Messgenauigkeit. Hinzu kommt, dass die Feuchteanalysatoren im Betrieb nicht kalibriert sind.

Die hohe Zugabe von Flüssigkeit von 5,5 – 6,5% beim **Futter für Schafe, Freizeitpferde und das Rindermastfutter (2316/2321)** findet sich weder im Feuchteanalysator des Betriebs noch bei den Labormessungen wieder. Die Erhöhung der Feuchte liegt nur zwischen 1 - 2 %. Eine mögliche Erklärung wäre, dass sich die Angabe der Flüssigkeitsmenge auf Produkte bezieht, die nur ca. einen 50 %igen Wasseranteil haben wie z. B. Melasse oder es sich um Öle handelt.

Auffällig ist, dass gerade bei diesen drei Produkten die Staubungsneigung zwar durch die Zugabe von Flüssigkeit abnimmt, aber auf einem relativen hohen Niveau verbleibt. Eine Korrelation zwischen der Menge an Flüssigkeitszugabe zum Staubungsverhalten lässt sich nicht herstellen. Die nachfolgende Abbildung 6 verdeutlicht dies.

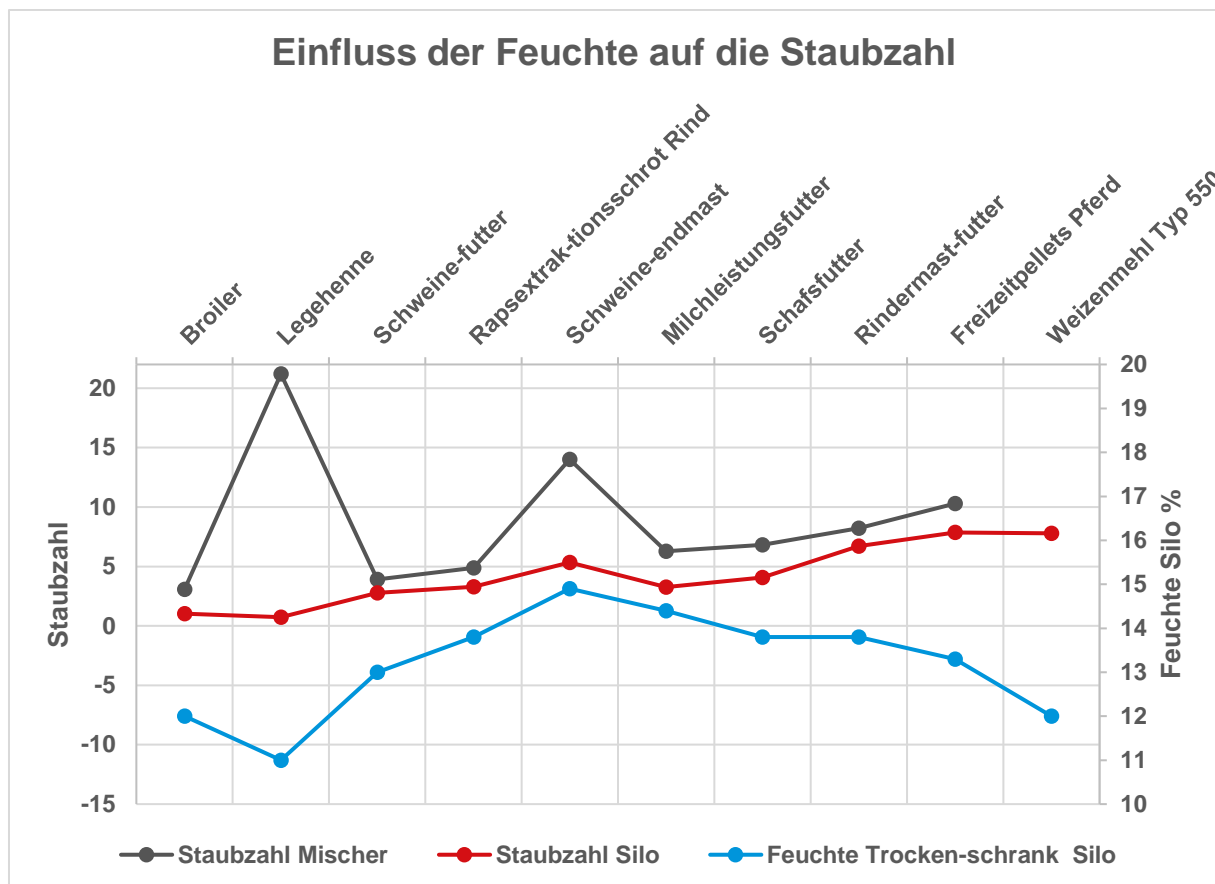


Abbildung 6: Einfluss der Feuchte auf die Staubzahl der Futtermittelmischungen

Der **Abbildung 6** ist außerdem zu entnehmen, dass die Erniedrigung der Staubzahl der Futtermittel durch die Flüssigkeitszugabe labortechnisch nachweisbar ist.

Die Staubzahl der feuchten Futtermittel lag zwischen 0,5 und 7,9, die von Weizenmehl Typ 550 bei 7,8.

Auffällig sind teilweise **hohe Staubzahlen bis ca. 18** bei den noch **nicht befeuchteten Futtermittelmischungen** nach der Vermahlung. Im Mischer ist deshalb bei einigen Stoffen von einer höheren Staubungsneigung als bei Weizenmehl Typ 550 auszugehen.

In der nachfolgenden **Abbildung 7** sind die Staubzahlen der 2023 der BGN zur Verfügung gestellten Futtermittelmischungen und einzelner Rohwaren zu finden.

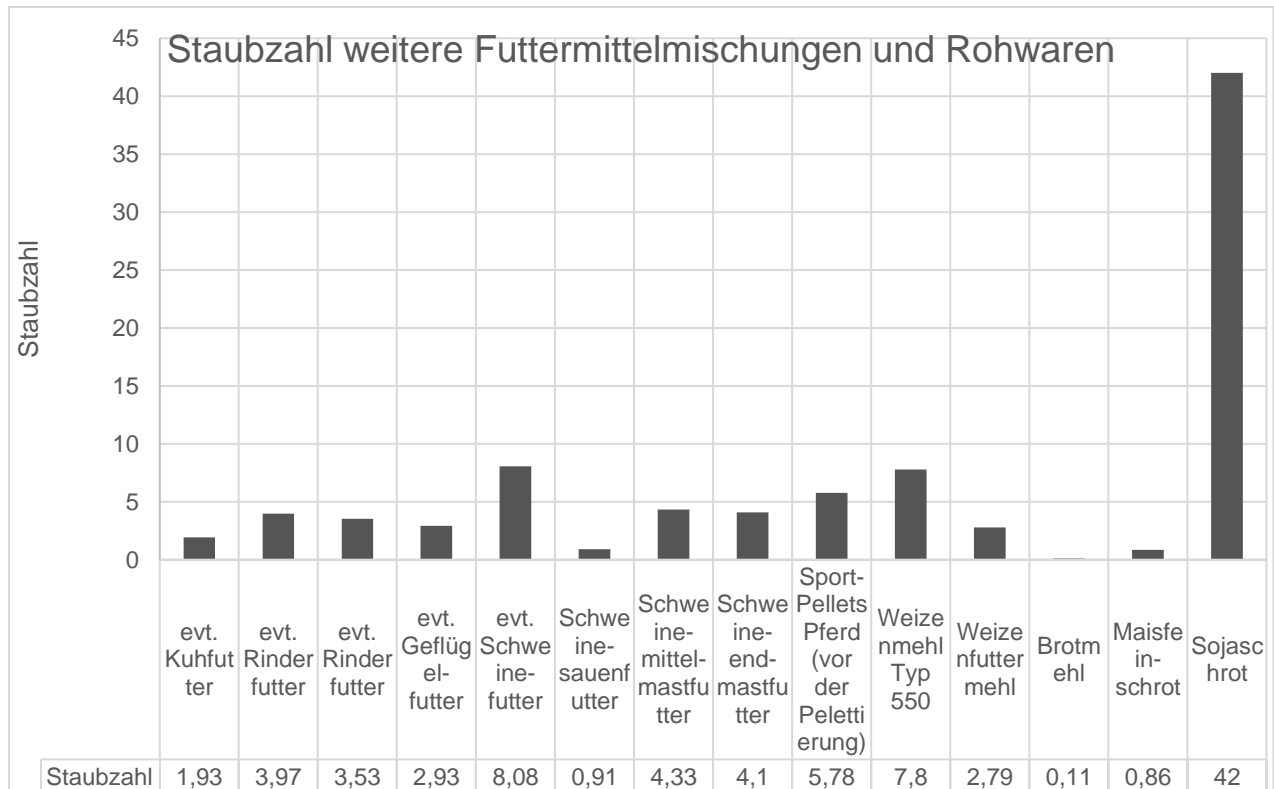


Abbildung 7: Staubzahl weitere Futtermittelmischungen und Rohwaren

Bei den **untersuchten Rohwaren** bewegt sich die Staubzahl zwischen 0,1 und 42. Bei einigen Futtermittelmischungen (hier Freizeitpellets Pferd vor der Pelletierung (Abb. 6) und evt. Schweinefutter (Abb. 7)) wird somit ein **vergleichbares Staubungsverhalten wie von Weizenmehl TYP 550** erreicht und bei Sojaschrot ein vielfach höheres.

4.3 Explosionsfähigkeit in der Hartmannapparatur – EN ISO 80079-20-2

In der sogenannten Hartmann-Apparatur, einem stehenden 1,2 l-Glaszylinder mit Glühwendel, wird die Explosionsfähigkeit und -heftigkeit der Futtermittelmischungen untersucht.

Die Staubprobe wird auf dem Boden des Glasrohrs gleichmäßig verteilt und mittels Luftstoß gegen die heiße Glühwendel aufgewirbelt. Unter Variation der Staubkonzentration über einen breiten Bereich werden Zündversuche unternommen und das Reaktionsverhalten visuell festgestellt. Als Hilfsmittel liegt auf dem Glasrohr ein Deckel mit Drehgeber lose auf. Mögliche Stellungen des Deckels sind:

- 0 – kein Druckanstieg (DA),
- 1 – mittlerer Druckanstieg (DA)
- 2 – hoher Druckanstieg (DA)

Wird beim Versuch eine Flammenausbreitung mit oder ohne Anheben des Deckels festgestellt, ist das Produkt als „staubexplosionsfähig“ einzustufen.

Die Aussage „nicht explosionsfähig“ kann aus dieser Prüfung nicht abgeleitet werden. Falls es zu keiner Entzündung kommt, sind für ein eindeutige Ergebnis, weiterführende Prüfungen in der sogenannten 20 l-Kugel nötig. (nach VDI 2263 Bl.1)

Die o. g. Versuche wurden zu Dokumentationszwecken auch gefilmt.

4.3.1 Ergebnisse der Untersuchung in der Hartmann-Apparatur:

Für alle untersuchten Futtermittelmischungen konnte schon im Urmuster (Anlieferungszustand) eine Entzündung im Hartmann-Rohr, allerdings ohne Druckaufbau, festgestellt werden. Sie fand bedingt durch den geringen Anteil feiner Partikel eher im höheren Konzentrationsbereich statt. Bei niedrigen Konzentrationen war die Entzündung sehr schwach ausgeprägt, aber mit zunehmender Konzentration sehr eindeutig.

Die untersuchten Futtermittelmischungen sind somit grundsätzlich selbst im Urmuster als explosionsfähig einzustufen.

Zum Beispiel konnte beim Broiler-, Legehennen- und Schaffutter eine Stichflamme ohne Anheben des Deckels beobachtet werden.

Beim Schweinevormast-, Rindermast-, Pferde-, Milchleistungsfutter und das Rapsextraktionschrot für das Rind wurde der Deckel bis auf Stufe 1, beim Schweineendmastfutter bis auf Stufe 2 angehoben.

Prüfungen mit dem genormten Labormuster (Fraktion < 250 µm) zeigten teils heftige Reaktionen, bei denen der Deckel bis auf Stufe 2 (Maximum) angehoben wurde.

Nachfolgend ist für drei Futtermittelsorten die Flammenentwicklung jeweils im Urmuster und genormten Labormuster < 250 µm zu sehen. Die Ergebnisse für die einzelnen Futtermittel finden sich in der **Tabelle 6.7** im Anhang.



Abb. 8: Broilerfutter Urmuster, 2.000 g/m³, DA 0,1



Abb. 9: Broilerfutter genormtes Labormuster (Fraktion < 250 µm), 2.000 g/m³, DA 0,1

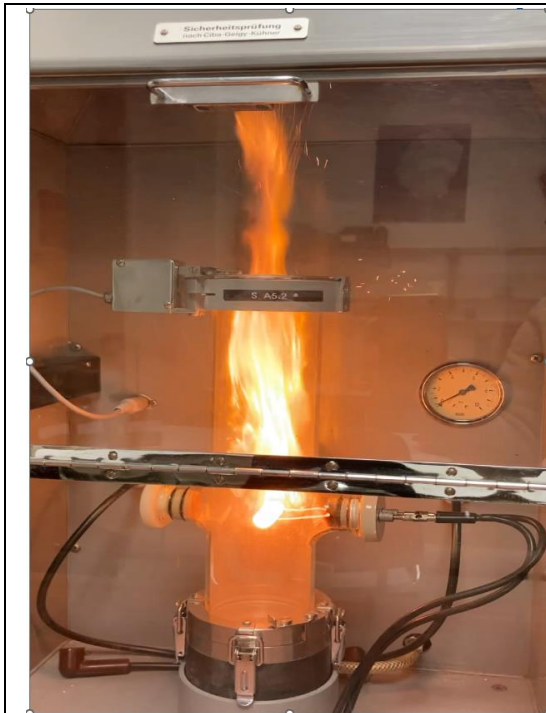


Abb. 10: Rindermastfutter Urmuster 2.000 g/m³, DA 0,1



Abb. 11: Rindermastfutter genormtes Labormuster (Fraktion < 250 µm), 2.000 g/m³, DA 1



Abb. 12: Schweineendmastfutter Urmuster, 1.000 g/m³, DA 0,1



Abb. 13: Schweineendmastfutter genormtes Labormuster (Fraktion < 250 µm), 500 g/m³, DA 2

4.4 Bestimmung der Mindestzündenergie mit Induktivität (MZE in mJ): EN ISO 80079-20-2

Unter der Mindestzündenergie MZE versteht man, die kleinste in einem Kondensator gespeicherte elektrische Energie, deren Entladung ausreicht, um das zündwilligste explosionsfähige Staub-/Luftgemisch zu entzünden.

Für die Untersuchung kam die Apparatur MIKE3 zum Einsatz. Bei den Versuchen wird eine gewisse Menge Probe auf dem Boden des Glasrohres gleichmäßig verteilt. Mittels Druckluftstoß wird die Probe aufgewirbelt. Nach einer bestimmten Zeit (Zündverzögerung) wird der Zündversuch mit Hilfe eines elektrischen Funkens durchgeführt. Durch eine Induktivität im Entladekreis wird der Funke zeitlich gedehnt.

Um die geringste Energie zu finden, werden Staubkonzentration und Zündverzögerungszeit variiert. Es werden jeweils 10 Zündversuche pro Einstellung unternommen. Nicht jeder Zündfunke ist zündwillig. Entscheidend ist, dass eine hinreichend große Energie in das Staub-/Luftgemisch eingetragen wird, um eine selbständige Verbrennung des ganzen Gemisches auszulösen.

4.4.1 Ergebnisse der Bestimmung der Mindestzündenergie m. Induktivität:

Bei den Versuchen zeigte sich ein Unterschied zwischen dem angelieferten Produkt (Urmuster) und dem genormten Labormuster (< 250 µm gesiebt und getrocknet). Keine der Proben konnte im Anlieferungszustand zur Entzündung gebracht werden, d.h. die Mindestzündenergie muss größer 1.000 mJ (max. mögliche Energie der Apparatur) sein.

Im aufbereiteten Zustand aber reichten Energien zwischen 30 mJ bis 300 mJ aus, um die Staubwolken zu entzünden.

Die Ergebnisse für die einzelnen Futtermittel finden sich in der **Tabelle 6.7** im Anhang.

4.5 Bestimmung der Brennzahl (BZ): DIN 17077 (2018)

Die Brennzahl stellt eine wichtige Kenngröße zur Charakterisierung des Brandverhaltens von Feststoffen dar. Sie hat Einfluss auf die Wahl des Brandschutzkonzepts und die Festlegung von geeigneten Brandbekämpfungsmaßnahmen.

Bei der Untersuchung im Labor wird die Brennbarkeit und das Brennverhalten einer Schüttung bestimmt.

Die Untersuchung erfolgte bei Raumtemperatur. Hierfür wurde mittels Form eine dreieckige Produktschüttung auf einer keramischen Platte erstellt. Zur Prüfung wurde für 5-10 s ein heißer Platindraht am Rand der Schüttung eingetaucht und nach Entfernen der Zündquelle die Reaktion beobachtet. Die Zuordnung zu einer Brennzahl erfolgte nach dem folgenden Schlüssel:

1	kein Anbrennen
2	kurzes Anbrennen und rasches Erlöschen
3	örtliches Brennen oder glimmen mit höchstens geringer Ausbreitung
4	durchglühen ohne Funkenwurf (Glimmbrand) oder langsame, flammenlose Zersetzung
5	Ausbreitung eines offenen Brandes oder Abbrennen unter Funkensprühen
6	verpuffungsartiges Abbrennen oder rasche, flammenlose Zersetzung

4.5.1 Ergebnisse der Bestimmung der Brennzahl

Sowohl für die untersuchten Rohwaren als auch die Futtermittelmischungen wurde stets eine Brennzahl 2 sowohl im Ur- als auch genormten Muster (Fraktion < 250 µm) ermittelt. Aufgrund der Zusammensetzungen der Futtermittelmischungen (u. a. Zusatz von Ölen oder Melasse) kann aber nicht davon ausgegangen werden, dass dieses Kriterium von allen Produkten eingehalten wird. Dies ist individuell zu prüfen.

Die Ergebnisse für die einzelnen Futtermittel finden sich in der **Tabelle 6.7** im Anhang.

4.6 Bestimmung der Mindestzündtemperatur

4.6.1 Mindestzündtemperatur einer Staubschicht (Glimmtemperatur GT in °C) EN ISO 80079-20-2

Heiße Oberflächen können Staub, der sich dort abgelagert hat, entzünden. Im Labor wird unter vorgeschriebenen Versuchsbedingungen die niedrigste Temperatur einer heißen Oberfläche ermittelt, bei der eine Staubschicht von 5 mm Dicke entzündet wird. Die Grenze von Zünden und Nicht-Zünden wurde auf 10°C genau bestimmt.

Anmerkung:

Die Glimmtemperatur nimmt nahezu linear mit der Zunahme der Schichtdicke ab. Die angegebene Mindestzündtemperatur ist deshalb nur bis zu einer Staubschicht von 5 mm anwendbar.

4.6.2 Mindestzündtemperatur einer Staubwolke (Zündtemperatur ZT in °C): EN ISO 80079-20-2

Heiße Oberflächen können eine Staubwolke entzünden.

Für die **Mindestzündtemperatur einer Staubwolke** wird unter vorgeschriebenen Versuchsbedingungen die niedrigste Temperatur einer heißen Oberfläche ermittelt, bei der sich das zündwilligste Gemisch des Staubes mit Luft gerade nicht mehr entzündet.

Die Ermittlung der Mindestzündtemperatur erfolgt im sogenannten BAM-Ofen. Hierbei wurde die Probe mittels Blasebalgs gegen die im Ofen liegende Platte geblasen. Die Reaktion wurde visuell bewertet. Die Temperatur wurde auf 10°C genau bestimmt.

4.6.3 Ergebnisse der Bestimmung der Mindestzündtemperaturen:

Im **Urmuster** lag die **Glimmtemperatur (GT)** bei Schweine- und Schweineendmastfutter oberhalb 450°C, bei den anderen untersuchten Futtermitteln zwischen 420 bis 450°C.

Einige der untersuchten **Labormuster** wie z. B. Schweine- und Schweineendmastfutter (Fraktion < 250 mm) konnten teilweise schon ab 300°C Plattentemperatur entzündet werden.

Die ermittelten **Mindestzündtemperaturen der Staubwolke (ZT)** lagen für die untersuchten Futtermittelmischungen im **Urmuster** zwischen 400°C – 430 °C und in der aufbereiteten **Labormuster** zwischen 360°C – 390 °C.

Die Ergebnisse für die einzelnen Futtermittel finden sich in der **Tabelle 6.7** im Anhang.

Anmerkung:

Bei dem Broiler, Legehennen- und Schweinefutter wurde festgestellt, dass sich die Mindestzündtemperatur der Staubschicht (GT) und der Staubwolke (ZT) der Urmuster vor und nach der Flüssigkeitszugabe kaum oder gar nicht unterscheiden. Auch das genormte Labormuster des Broilerfutters vor und nach der Flüssigkeitszugabe zeigt für das Broilerfutter bezüglich der Mindestzündtemperatur der Staubwolke gleiche Werte. Das ist naheliegend, da es lediglich die getrockneten Proben des Urmusters sind.

Insofern ist zu vermuten, dass der Einfluss der Zugabe von Flüssigkeiten auf die Mindestzündtemperaturen (GT u. ZT) vernachlässigbar ist.

Deshalb wurden die Mindestzündtemperaturen nicht für alle Produkte sowohl vor als auch nach der Flüssigkeitszugabe bestimmt.

4.7 Explosionsversuche in der geschlossenen Apparatur – 20l-Kugel (DIN EN 14034)

Zur Prüfung der Explosionskenngrößen maximaler Explosionsüberdruck (p_{max}), maximaler zeitlicher Druckanstieg (dp/dt) und Staubexplosionskonstante K_{ST} -Wert sowie untere Explosionsgrenze (UEG) wurde die geschlossene Apparatur „20 l-Kugel“ verwendet. Die Kenngrößen beschreiben das Explosionsverhalten eines Staubes in einem geschlossenen System.

Die Staubprobe wird hierbei aus einem Vorratsbehälter mit Druckluft über ein spezielles Verteilsystem in die Explosionskammer eingeblasen. Zündversuche wurden durch Variation der Staubkonzentration über einen weiten Bereich unternommen sowie Wiederholungsversuche. Der Explosionsverlauf wurde mit Druckaufnehmern erfasst und am Computer dargestellt. Als Zündquelle dienten bei der Bestimmung von p_{max} und K_{ST} zwei pyrotechnische Zünder mit jeweils 5 kJ. Für die Bestimmung der UEG sind 2 Zünder mit je 1.000 J zur Anwendung gekommen.

4.7.1 max. Explosionsüberdruck (p_{max} in bar): DIN EN 14034-1

Der max. Explosionsüberdruck (p_{max}) entspricht dem ermittelten maximalen Druck, der in einem geschlossenen Behälter bei der Explosion eines Staub-/Luftgemisches auftritt.

4.7.2 Staubexplosionskonstante (K_{St} -Wert in $bar \cdot m \cdot s^{-1}$): DIN EN 14034-2

Die Staubexplosionskonstante (K_{St} – Wert) wird aus dem maximalen zeitlichen Druckanstieg mittels „kubischen Gesetz“ berechnet. Er drückt die Abbrandgeschwindigkeit der Verbrennung aus und ist zahlenmäßig gleich dem Wert für die max. Druckanstiegsgeschwindigkeit bei einer Explosion eines Staub-/Luftgemisches in einem 1 m³ Behälter.

Anmerkung:

Dieser Wert ergibt zusammen mit dem maximalen Überdruck (p_{max}) die Grundlage für die Berechnung von Druckentlastungsflächen.

4.7.3 Ergebnisse der Explosionsversuche

Im **Urmuster** lag der max. Explosionsdruck der Futtermittelmischungen knapp unter 6 bar und der K_{St} – Wert zwischen 26 bis 54 $bar \cdot m/s$.

Im **genormten Labormuster** werden max. Explosionsdrücke bis ca. 8 bar (7,1 – 7,6 bar) bei einem K_{St} – Wert zwischen ca. 50 und 80 $bar \cdot m/s$ erreicht.

Nur das Legenhennenfutter zeigte eine deutliche schwächere Explosion mit p_{max} , von 3,5 bar und K_{St} – Wert von 22 $bar \cdot m/s$ im Urmuster und 5,9 bar und 27 $bar \cdot m/s$ im genormten Labormuster.

Die Ergebnisse für die einzelnen Futtermittel finden sich in der **Tabelle 6.7** im Anhang.

5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Bandbreite der in den Betrieben eingesetzten Rohwaren ist sehr hoch. In jedem Betrieb findet sich eine Vielzahl an Rezepturen. Futtermittelmischungen werden häufig kundenspezifisch hergestellt.

Für diese Untersuchung wurden deshalb eine Vielzahl von Futtermittelmischungen für verschiedene Tiere wie Schwein, Rind, Broiler, Legehennen, Schaf und Pferd ausgewählt. Auch Rohwaren wie Weizenfuttermehl, Brotmehl, Sojaschrot, Rapsextraktionsschrot, Pellets aus Sonnenblumenschrot und Rapsexpeller sind untersucht worden.

Es zeigte sich, dass trotz der Vielfalt der Futtermittelmischungen deren Beschaffenheit und sicherheitstechnischen Kennzahlen sehr ähnlich sind.

Für die untersuchten Produkte können die Ergebnisse wie nachfolgend zusammengefasst werden:

- **Rohwaren** wie Rapsextraktionsschrot, Maisfeinschrot, Brotmehl, Weizenfuttermehl, etc. enthalten nach den Siebanalysen der BGN ca. 30 – 60 % explosionsfähige Partikel der Fraktion < 500 µm, ca. 15 – 40 % der Fraktion < 250 µm und 10 – 20 % der Fraktion < 125 µm.

Diese Partikelgrößenverteilung findet sich auch für Maiskleberfutter, Weizenkleie, Raps-/ Sojaschalen, Sojaschrot und Rapsextraktionsschrot in der BGN Staub-Datenbank aus früheren Untersuchungen (siehe Tabelle 6.5) wieder. Es wird aber auch deutlich, dass Produkte wie z. B. Weizenkleie und Sojaschrot in der Größenverteilung weit streuen können.

- Bei **Rohwaren** wie Sojaschrot, Rapsexpeller liegt der Anteil an explosionsfähigen Partikeln der Fraktion < 500 µm bei ca. 13 %, der Fraktion < 250 µm bei 6 - 10 % und die Fraktion < 125 µm enthielt nur noch 2 – 10 %.
- Bei **pelletierter Ware** mit Öl oder Fett als Bindemittel wie z. B. Sonnenblumenschrot ist der Anteil an explosionsfähigen Partikeln i.d.R. vernachlässigbar.
- **Fertigfuttermischungen** bestehen i.d.R. aus einem Gemisch von groben Partikeln >> 1.000 µm und feineren Fraktionen. Sie enthalten nach den Siebanalysen der BGN ca. 30 – 60% explosionsfähige Partikel der Fraktion < 500 µm, ca. 20 – 36 % der Fraktion < 250 µm und 10 – 20 % der Fraktion < 125 µm. Der Medianwert liegt zwischen 1.500 µm und 410 µm. Der **Anteil an anorganischen Stoffen** wirkt sich bei den meisten Futtermitteln kaum auf die Korngrößenverteilung der explosionsfähigen Partikel bezogen auf die gesamte Futtermittelmischung aus.
- Futtermittelmischungen, deren Rohwaren **nur über den Walzenstuhl**, ohne Hammermühle, zerkleinert werden, wie z.B. das Schweinemastfutter, können ebenfalls explosionsfähige Partikel < 250 µm von ca. 20 % enthalten.
- Die **Zugabe von wasserhaltiger Flüssigkeit** zu den Futtermittelmischungen erhöht die Feuchte um ca. 1 – 2 %. Teilweise werden auch Öle zugesetzt, die nicht von der Feuchtemessung erfasst werden. Die Laborergebnisse zeigen, dass der Zusatz dieser Flüssigkeiten das **Staubungsverhalten** mindert.
- Ein Rückschluss von der zugebenen Menge an Flüssigkeiten auf das Staubungsverhalten ist eher nicht möglich, sondern scheint überwiegend produktabhängig zu sein. Einige Futtermittelmischungen wie Rindermastfutter und Freizeitpellets für das Pferd (vor der Pelletierung) zeigen ein vergleichbares Staubungsverhalten wie Weizenmehl Typ 550.

Schrote wie Sojaschrot können ggf. stärker stauben als Weizenmehl.

- Das **Legehennenfutter** enthält wesentlich mehr Kalk als die anderen Futtermittel. Das zeigt sich auch beim Glühverlust, der in der Fraktion $< 250 \mu\text{m}$ zwischen 15 und 20 % beträgt. Das noch nicht mit Flüssigkeit versetzte Futter zeigte eine auffällig hohe Staubungszahl, die vermutlich dem Kalk geschuldet ist. Aus dem Ackerbau ist die hohe Staubungsneigung des Kalks bekannt, weswegen seine Ausbringung bei wenig Wind und hoher Luftfeuchte empfohlen wird. Das ist auch insofern plausibel, als dass durch die Flüssigkeitszugabe so gut wie kein Stauben mehr festzustellen war.

Kalk in Form von Calciumcarbonat (CaCO_3) ist nicht brennbar. Er wandelt sich lediglich oberhalb von 900°C chemisch in Calciumoxid (CaO) unter Freisetzung von CO_2 um.

Auffällig ist die die niedrige Mindestzündtemperatur von 300°C und Mindestzündenergie von 10 – 30 mJ der genormten Laborprobe im Vergleich zu den anderen Futtermitteln.

- Noch nicht befeuchtete Futtermittelmischungen, die im Mischer verarbeitet werden, weisen teilweise ein deutlich stärkeres Staubungsverhalten als Weizenmehl Typ 550 auf.

Einstufung der Futtermittel hinsichtlich der Explosionskenngrößen

- Selbst im Urmuster ließen sich alle von der BGN untersuchten Futtermittelmischungen im **Hartmannrohr** zünden. Die **Mindestzündenergien** dieser Schüttgüter liegen aber im Urmuster bei $> 1.000 \text{ mJ}$.

Kommt es zu Staubablagerungen oder zu Entmischungen ist mit wesentlich niedrigeren Mindestzündenergien zu rechnen. Für die Partikelfraktion $< 250 \mu\text{m}$ sank bei den von der BGN untersuchten Futtermitteln die Mindestzündenergie auf 30 - 300 mJ ab. Für feinere Fraktionen ist mit einer weiteren Abnahme zu rechnen.

- Die hier untersuchten Rohwaren und Futtermittelmischungen sind bezüglich der Brennbarkeit für die Anteile $< 250 \mu\text{m}$ maximal den **Brennzahlen** BZ 2 (kurzes Anbrennen und rasches Auslöschen) zuzuordnen.

In den Datenbanken, die auch noch andere in der Futtermittelindustrie übliche Produkte enthalten, sind auch Brennzahlen von 3 (örtliches Brennen oder Glimmen ohne Ausbreitung) zu finden. Staubanteile von z. B. Getreidemischstaub aus Filteranlagen, Reis und Soja können nach den dortigen Daten ein Verhalten nach BZ 4 haben (Durchglühen ohne Funkenwurf oder langsame flammenlose Zersetzung). Auch der Abrieb von Sonnenblumenkernen und getrockneten Erbsenfasern ist der Brennzahl 4 zugeordnet.

- Die sicherheitstechnischen Kenndaten für die bei dieser Untersuchung verwendeten Rohwaren und Futtermittel liegen **im genormten Labormuster** (Fraktion $< 250 \mu\text{m}$) in folgenden Bereichen:
 - **Mindestzündtemperatur des aufgewirbelten Staubes** bei $\geq 360^\circ\text{C}$
 - **Mindestzündtemperatur** einer Staubschicht bei $\geq 300^\circ\text{C}$.
 - **Explosionsüberdrücke** $< 8 \text{ bar}$
 - **K_{St} -Wert** $< 100 \text{ bar}^* \cdot \text{m/s}$.

6 Anhang

6.1 Partikelgrößenverteilung ohne Abzug der anorganischen Anteile (Urmuster) der Futtermittel und deren Glühverlust (Beprobung Februar 2024)

Nr.	Luftstrahlsieb [µm]	<500	<250	<125	<63	<32	50%-Per- centil	Glüh- verlust
2303	Broilerfutter	30,5	18,3	10,9	7,1	4,1	944	95,0%
2305	Legehennfutter	26,1	14,2	9,1	6,7	4,9	1500	85,0%
2307	Schweinefutter	33,5	17,6	10,3	7,1	4,6	885	93,5%
2308	Rapsextraktionsschrot für Rinder	59,7	29,2	15	9,3	6,8	420	90,5
2310	Schweineendmastfutter	33,7	20,8	14,1	10,4	7,7	836	92,5%
2312	Milchleistungsfutter	48,5	27,8	17	11,7	8,5	515	90,7%
2315	Schafsfutter	43,9	25,1	15,5	11	7,9	570	90,5
2316	Rindermastfutter	61,2	35,7	19,4	13,4	9,9	410	90,4%
2317	Freizeitpellets Pferd (vor der Pelletierung)	52,7	31,1	18,6	12,8	9	474	87,1%
2332	Legehennenalleinfutter (Walzenstuhl)	14,5	7,1	3,2	1,8	1	1568	80,7%
2333	Schweinemastfutter (Walzenstuhl)	33,6	18,8	10,5	5,4	1,9	806	91,8%

6.2 Partikelgrößenverteilung mit Abzug der anorganischen Anteile


(Annahme: gemessener anorganischer Anteile der Fraktion < 250 µm findet sich auch in den Fraktionen < 125 µm, < 63 µm und < 32 µm) (Beprobung Februar 2024)

Nr.	Luftstrahlsieb [µm]		<250	<125	<63	<32
2303	Broilerfutter		17,4	10,4	6,7	3,9
2305	Legehennenfutter		12,1	7,7	5,7	4,2
2307	Schweinefutter		16,5	9,6	6,6	4,3
2308	Rapsextraktionsschrot für Rinder		26,4	13,6	8,4	6,2
2310	Schweineendmastfutter		19,2	13,0	9,6	7,1
2312	Milchleistungsfutter		25,2	15,4	10,6	7,7
2315	Schafsfutter		22,7	14,0	10,0	7,1
2316	Rindermastfutter		32,3	17,5	12,1	8,9
2317	Freizeitpellets Pferd (vor der Pelletierung)		27,1	16,2	11,1	7,8
2332	Legehennenalleinfutter (Walzenstuhl)		5,7	2,6	1,5	0,8
2333	Schweinemastfutter (Walzenstuhl)		17,3	9,6	5,0	1,7

6.3 Partikelgrößenverteilung der der BGN zugesandten anonymen Futtermittelmischungen vom Mai 2023 ohne Abzug der anorganischen Anteile (Urmuster)

	Luftstrahlsieb [µm]	<500	<250	<125	<63	<32	50%- Percentil
2254	evt. Kuhfutter	58,6	31,9	17,4	8,4	3,4	400
2257	evt. Futter für Rinder	56,8	35,7	20,6	13,4	8,8	400
2258	evt. Futter für Rinder	47,8	25,9	13,5	7,8	4,6	530
2255	evt. Geflügel- futter	51,1	30,3	18,4	9,5	2,6	487
2256	evt. Schweine- futter	35,8	21	13,2	8,6	5,6	756
2260	Schweinesau- enfutter	36,5	20,5	11,8	7,6	5	710
2261	Schweinemittel- mastfutter	44,1	24	12,8	8,5	5,7	548
2262	Schweineend- mastfutter	41	24,1	12,7	8	4,7	645
2259	Sport-Pellets Pferd (vor der Pelettierung)	45,6	27,5	16,1	10,3	6,8	560

6.4 Partikelgrößenverteilung der Rohwaren (erhalten Februar - Mai 2024)

	Luftstrahlsieb [µm]	 <500	<250	<125	<63	<32	50%- Percentil
2323	Weizen- futtermehl (Rohware)	94,5	49,1	14,1	5,9	4,1	254
2327	Maisfeinschrot (Rohware)	61,3	42,3	29,9	16,6	4,8	350
2324	Brotmehl (Rohware) UM	36,1	14,8	7	5,5	4,1	730
2328	Spjaschrot (Rohware)	12,9	10,6	9,5	8,1	5,6	1.600
2326	Rapsexpeller	13,3	6	2,1	0,1		4.000
2325	Sonnen- blumenschrot (Pellet-Rohware)	0,6	0,5	0,3	0,1		>4.000

6.5 Partikelgrößenverteilung von Rohwaren aus der Staub-Datenbank der BGN

Luftstrahl- sieb [µm]	<500	<250	<125	<63	<32
Weizen- kleber	100%	99,9	95,5	63,3	33,6
Maiskleber- futter	39%	17,6	7,2	2,7	1
Weizenkleie	23,6	15,1	13,5	12,1	9,2
Weizenkleie	8,2	5,5	4,9	4,7	3,6
Weizenkleie	44,3	17,5	10,8	8,9	4,2
Weizenkleie	66,8	30	14,2	12,5	10,1
Weizenkleie	47,9	21,1	12,1	9,1	5,9
Rapssaat	14,2	5,4	3,2	2,4	1,8
Rapsextrak- tionsschrot	42,2	18,6	9,1	5,2	4,3
Raps Sojaschalen (Eiweiß- konzentrat	43	23,1	14,1	9,6	6,5
Sojaschalen	32,7	19,2	11,4	7,6	6,3
Sojaschrot	76,7	44	27,2	18,8	14,3
Sojaschrot	42,1	13,9	7,2	5,5	4,4
Sojaschrot	24,8	7,4	4,2	3	2
Sojaschrot Low Pro	27,9	15,3	9,4	8,9	4,6

6.6 Feuchte der Futtermischungen nach dem Mischer und nach dem Elevator vor der Einlagerung ins Silo in Abhängigkeit der Messverfahren (erhalten Februar - Mai 2024)

Nr.	Probenahmeort	Futtersorte	Feuchte-analysator Betrieb [%]	Trockenschrank 105 °C, [%]	Feuchte-analysator Labor 105°C, [%]
2302	nach Mischer o. fl. Zugabe	Broilerfutter trocken	n. b.	11,4	10,9
2303	nach Elevator, vorher fl. Zugabe	Broilerfutter feucht	n. b.	12	11,8
2304	nach Mischer o. fl. Zugabe	Legehennenfutter trocken	n.b.	10,9	9,8
2305	nach Elevator, vorher fl. Zugabe	Legehennenfutter feucht	11,5	11	10,4
2306	nach Mischer o. fl. Zugabe	Schweinefutter trocken	n.b.	12	11,7
2307	nach Elevator, vorher fl. Zugabe	Schweinefutter feucht	13,7	13	12,7
2309	nach Mischer o. fl. Zugabe	Rapsextraktionsschrot Rind trocken	12,7	12,3	12,2
2308	nach Elevator, vorher fl. Zugabe	Rapsextraktionsschrot Rind feucht	13,9	13,8	14,1
2311	nach Mischer o. fl. Zugabe	Schweineendmast trocken	12,7	12,7	12,8
2310	nach Elevator, vorher fl. Zugabe	Schweineendmast feucht	16,2	14,9	15,4
2313	nach Mischer o. fl. Zugabe	Milchleistungsfutter trocken	12,5	12,2	12,0
2312	nach Elevator, vorher fl. Zugabe	Milchleistungsfutter feucht	15,1	14,4	14,4

Nr.	Probe- nahme- ort	Futter- sorte	Feuchte- analysator Betrieb [%]	Trocken- schrank 105 °C, [%]	Feuchte- analysa- tor Labor 105 °C, [%]
2320	nach Mi- scher m. fl. Zugabe	Schaffutter feucht nach Mischer	14,9	12,9	12,9
2315	nach Eleva- tor, vorher zusätzl. fl. Zugabe	Schaffutter feucht vor Silo	15,0	13,8	13,8
2321	nach Mi- scher m. fl. Zugabe	Rindermast- futter feucht nach Mischer	13,3	12,8	13,0
2316	nach Eleva- tor, vorher zusätzl. fl. Zugabe	Rindermast- futter feucht vor Silo	14,2	13,8	13,4
2322	nach Mi- scher m. fl. Zugabe	Freizeitpellets Pferd feucht nach dem Mi- scher	12,5	11,9	11,8
2317	nach Eleva- tor, vorher zusätzl. fl. Zugabe	Freizeitpellets Pferd feucht vor Silo	14,3	13,3	12,9
2323	Rohwaren- silo	Weizenfutter- mehl (Roh- ware)		11,4	11,6
2324	Rohwaren- silo	Brotmehl (Rohware)		13,5	14,0
2325	Rohwaren- silo	Sonnen-blü- menschrot (Pellet-Roh- ware)		10,4	10,9
2326	Rohwaren- silo	Rapsexpeller		9,6	10,3
2327	Rohwaren- silo	Maisfein- schrot		12,3	12,7
2328	Rohwaren- silo	Sojaschrot (Rohware)		11,6	12,3
2329	FSA Kappel- rodeck Sack- ware	Weizenmehl Typ 550		12	12,7

Tab. 6.5 Feuchte der Futtermischungen nach dem Mischer und nach dem Elevator vor der Einlagerung ins Silo in Abhängigkeit der Messverfahren (erhalten Februar - Mai 2024)

6.7 Sicherheitstechnische Kenndaten Zündtemperatur (ZT), Glimmtemperatur (GT), Mindestzündenergie (MZE), Brennzahl (BZ), max. Explosionsdruck (p_{max}), Staubexplosionskonstante K_{ST} , Reaktion im Hartmannrohr der untersuchten Futtermittelmischungen und Rohwaren

Nr.	Probenahmeort	Futtersorte		ZT [°C]	GT [°C]	MZE [mJ]	Hartmann-Rohr	p_{max}/K_{ST} [bar/bar*m/s]	BZ
2302	nach Mischer o. fl. Zugabe	Broilerfutter	UM	420	430	> 1.000	0,1	6,5/37	2
2302	nach Mischer o. fl. Zugabe		GM	360	310		0,1		2
2303	Elevator, vorher fl. Zugabe		UR	410	430	> 1.000	0,1	5,8/31	2
2303	Elevator, vorher fl. Zugabe		GM	360		100 - 300	0,1	7,1 / 53	
2304	nach Mischer o. fl. Zugabe	Legehennenfutter	UM	430	410	> 1.000	0,1		
2304	nach Mischer o. fl. Zugabe		GM		300	10-30	0,1	7,3 / 88	2
2305	Elevator, vorher fl. Zugabe		UM	430	420	> 1.000	0,1	3,5 / 22	2
2305	Elevator, vorher fl. Zugabe		GM	380			0,1	5,9 / 27	2

2306	nach Mischer o. fl. Zugabe	Schweinefutter	UM	410	kgb 450	> 1.000	0,1		2
2306	nach Mischer o. fl. Zugabe		GM	380	300	30 - 100			2
2307	Elevator, vorher fl. Zugabe		UM	410	kgb 450	> 1.000	0,1	5,5 / 31	2
2307	Elevator, vorher fl. Zugabe		GM				1		
2308	nach Elevator, vorher fl. Zugabe	Rapsextraktionsschrot Rind	UM	410	450	> 1.000	0,1	5,8 / 26	2
2308	nach Elevator, vorher fl. Zugabe		GM	390	400	100 - 300	1	7,3 / 62	2
2310	nach Elevator, vorher fl. Zugabe	Schweineendmastfutter	UM	400	kgb 450	> 1.000	0,1	5,9 / 30	2
2310	nach Elevator, vorher fl. Zugabe		GM	370	300	100 - 300	2	7,6 / 79	2

Nr.	Probe- nahmeort	Futtersorte		ZT [°C]	GT [°C]	MZE [mJ]	Hartmann- Rohr	p_{max}/K_{ST} [bar/ bar ² m/s]	BZ
2312	nach Elevator, vorher fl. Zugabe	Milchleistungs-futter	UM	400	420	> 1.000	0,1		2
2312	nach Elevator, vorher fl. Zugabe		GM	390	370	100 - 300	1		2
2315	nach Elevator, vorher zusätzl. fl. Zugabe	Schafsfuttrer	UM			> 1.000	0,1		2
2315	nach Elevator, vorher zusätzl. fl. Zugabe		GM			100 - 300	0,1		
2316	nach Elevator, vorher zusätzl. fl. Zugabe	Rindermast-futter	UM			> 1.000	0,1	5,9 / 54	2
2316	nach Elevator, vorher zusätzl. fl. Zugabe		GM			30 - 100	1	7,6/99	
2317	nach Elevator, vorher zusätzl. fl. Zugabe	Freizeitpellets Pferd (vor Pelletierung)	UM			> 1.000	0,1		2
2317	nach Elevator, vorher zusätzl. fl. Zugabe		GM			300 - 1.000	1		

2255	unbekannt, Wolking	Futtermittel evt. Geflügel	GM < 125 µm			30 - 100			
2256	unbekannt, Wolking	Futtermittel evt. Schwein	GM < 125 µm			30 - 100			
2260	unbekannt, Wolking	Schweinesauenfutter	GM < 125 µm			100 - 300			
2329	FSA Kappelrodeck	Weizenmehl Typ 550	GM < 63 µm	360	410	30 - 100		7,0/65	2
2323	Rohwarensilo	Weizenfutttermehl	UM			> 1.000		5,9 / 27	2
2324	Rohwarensilo	Brotmehl	UM			> 1.000			2
2325	Rohwarensilo	Sonnenblumenschrot (Pellet-Rohware)	UM						2
2328	Rohwarensilo	Sojaschrot	UM			> 1.000			2
2326	Rohwarensilo	Rapexpeller (Pellets)	UM						2

Tab. 6.7: Sicherheitstechnische Kenndaten Zündtemperatur (ZT), Glimmtemperatur (GT), Mindestzündenergie (MZE), Brennzahl (BZ), max. Explosionsdruck ($p_{max.}$), Staubexplosionskonstante KST, Reaktion im Hartmannrohr der untersuchten Futtermittelmischungen und Rohwaren



6.8 Feuchte der Futtermischungen nach dem Mischer und nach dem Elevator vor der Einlagerung ins Silo in Abhängigkeit der Messverfahren

