

Abschlussbericht

Bio-Schmierstoffe in Pelletpressen für die Futtermittelindustrie

Fördermittelgeber:	Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)
Auftragnehmer:	Institut für fluidtechnische Antriebe und Systeme (ifas); Kajo GmbH
Verfasser:	Sebastian Deuster (ifas), Manfred Postler (Kajo GmbH)
Aktenzeichen (AZ)	37628/01-36

Aachen, im Januar 2025

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Motivation	4
2	Stand der Technik.....	6
2.1	Mineralöle in Endverbraucherprodukten	6
2.2	Ursachen.....	8
2.2.1	Herstellung von Futtermitteln	8
2.3	H1-Schmierstoffe	11
3	Entwicklung eines Bio-Schmierfettes zum Einsatz in Futtermittelpressen... 	13
3.1	Auswahl geeigneter Inhaltstoffe	13
3.1.1	Grundöl	13
3.1.2	Verdicker	14
3.2	Formulierung und Herstellung	15
3.3	Labortests	20
3.3.1	Ruhepenetration und Walkpenetration (ASTM D 217) /AST21a/	20
3.3.2	Tropfpunkt (ASTM 2265) /AST22/	21
3.3.3	Grundölviskosität (ASTM D 7042) /AST21b/	21
3.3.4	SKF-EMCOR-Verfahren (DIN 51802) /DIN17/	22
3.3.5	Water Washout (ASTM D 1264) /AST18/	23
3.3.6	Vierkugel-Apparat (DIN 51350-4) /DIN15/	23
3.3.7	Ölabscheidung (DIN 51817) /DIN14/	24
3.3.8	Fließdruck (DIN 51805) /DIN16a/	25
4	Konstruktion und Entwicklung eines Prüfstandes zur Abbildung der Randbedingungen in Pelletpressen	26
4.1	Aufbau Pelletpressen in der Futtermittelindustrie	26
4.1.1	Kraftleitung auf die Kollerlager einer Pelletpresse	27
4.2	Entwicklung eines Prüfstandes zur anwendungsnahen Darstellung der Belastung von Kegelrollenlagern in Pelletpressen	28
4.2.1	Anforderungen an den Prüfstand	28
4.2.2	Konstruktive Umsetzung	29
	Radiale Krafteinleitung auf die Lager	34
5	Erprobung der Leistungsfähigkeit des Schmierfettes.....	36
5.1	Versuchsdurchführung	36
5.1.1	Inbetriebnahme des Prüfstandes.....	36
5.1.2	Versuche mit herkömmlichem Lithium-Schmierfett	37
5.1.3	Versuche mit Bio-Schmierfett.....	37
5.1.4	Ergebnisse	37
5.1.5	Abschließende Bewertung der Messergebnisse und weiteres Vorgehen	41
6	Öffentlichkeitsarbeit	43
I	Abbildungsverzeichnis.....	44
II	Tabellenverzeichnis.....	45
III	Literaturverzeichnis.....	46

1 Einführung und Motivation

Mineralölrückstände in Nahrungsmitteln stellen ein wachsendes Problem für die Gesundheit des Menschen sowie für die Umwelt dar. Sie gelangen durch verschiedene Quellen entlang der Lebensmittelproduktion in die Nahrungskette. Es konnten bereits Mineralöle in einer Vielzahl von Endverbraucherprodukten nachgewiesen werden, darunter Haferflocken, Speiseöle und Kosmetikprodukte /Bun18/, /Wen24/, /War15/, /Rat22/. Auch in tierischen Produkten wurden bereits Mineralöle nachgewiesen. Mineralöle setzen sich aus zwei wesentlichen Fraktionen zusammen. Zum einen aus MOSH (Mineral Oil Saturated Hydrocarbons), welche einen Anteil von 75 bis 85 Prozent einnehmen, und zum anderen aus MOAH (Mineral Oil Aromatic Hydrocarbons), welche mit einem relativen Anteil von 15 bis 25 Prozent vorliegen. Bei diesen Verbindungen handelt es sich um Kohlenwasserstoffe. Die Einnahme dieser Stoffe kann zu gesundheitlichen Schäden führen, beispielsweise zu einer Anreicherung der Substanzen im Körperfett oder zu Entzündungen. Die Langzeitriskien sind noch nicht abschließend geklärt. Es besteht die Möglichkeit, dass Mineralölrückstände über verschiedene Wege in Nahrungsmittel gelangen. Eine dieser Möglichkeiten ist die Aufnahme von kontaminierten Futterpellets aus Pelletpressen durch Nutztiere, welche anschließend über die Nahrungsmittelkette in den menschlichen Körper gelangen.

Ein Haupteinsatzgebiet von Pelletpressen ist die Futtermittelherstellung. Das Ausgangsmaterial wird pelletiert, wodurch eine Erhöhung der Dichte sowie eine einfachere Dosierung des Futtermittels erzielt wird. In den meisten Pressen ist zur Schmierung der Wälzlager ein zentrales Schmiersystem integriert. Dieses gewährleistet eine kontinuierliche Schmierung der Lager durch eine Verlustschmierung, wodurch ein Verschleiß der Bauteile reduziert wird. Dies bedeutet, dass die Schmierung durchgehend ohne Rückführung des Schmierstoffes stattfindet. In der Folge kommt der Schmierstoff mit dem Endprodukt, den Futtermittelpellets, in Kontakt. Für eine mittelgroße Pelletpresse kann eine mittlere Nachfüllmenge an Schmierfett von 60 g/h angenommen werden. Der Durchsatz an Futtermittel beträgt bei einer solchen Presse 800 kg/h, was einer Schmierstoffmenge von 75 mg pro Kilogramm Futtermittel entspricht. Der Grenzwert für MOSH im Getreide liegt beispielsweise bei 6 mg/kg /Nie20/. Aufgrund der Kontamination des Futters konnten Mineralöle unter anderem in der Fettphase von Hühnereiern sowie im Fettgewebe von Fleischwaren nachgewiesen werden. Dabei wurden Konzentrationen von bis zu 25 mg/kg bzw. 30 mg/kg ermittelt /Gro01/. Dies stellt ein Risiko für die Tiergesundheit sowie

die Gesundheit des Endkonsumenten dar. Es besteht beispielsweise der Verdacht, dass MOSH sich in Lymphdrüsen, Milz und Leber anreichern und in der Leber Granulome bilden. In Tierversuchen traten dabei auch Entzündungen auf. /Bun18/

Konstruktionsbedingt lässt sich der Kontakt des Schmierstoffs mit dem Futtermittel in den meisten Pressen nicht vermeiden, weshalb in diesem Projekt ein Bioschmierstoff nach DIN 16807 /DIN16c/ entwickelt wird, der für Lebensmittel unbedenklich ist. Um die Funktionseignung des Schmierstoffes nachzuweisen, wird dieser sowohl im Labormaßstab als auch unter anwendungsnahen Bedingungen getestet. Dazu erfolgt die Entwicklung eines Prüfstandes, welcher die mechanische Belastung auf die Wälzlager in Pelletpressen realitätsnah abbildet. Dadurch kann eine Aussage über die Eignung des Bioschmierstoffes als Schmierfett in Futtermittelpressen getroffen werden. Das Projekt soll den Verbraucherschutz und die Tiergesundheit bei der Futtermittelherstellung verbessern. Außerdem gilt es mit dem neuen biobasierten Schmierstoff, verglichen mit Mineralölen, identische oder bessere technische Eigenschaften in Bezug auf Reibminderung und Langlebigkeit der Wälzlager zu erreichen. Das Ziel des Projektes ist es ein Schmierfett zu entwickeln, welches umweltverträglich, biologisch schnell abbaubar und durch den Blauen Engel sowie das europäische Umweltzeichen EU-Ecolabel /EU 19/ zertifiziert ist.

Der Abschlussbericht präsentiert die Resultate des Forschungsprojekts. Zunächst werden die angewandte Methodik und der Aufbau des Projekts erörtert. Im Anschluss werden die Projektergebnisse dargelegt. Der Aufbau des Berichts ist so gestaltet, dass in jedem Kapitel zunächst die Entwicklung des Schmierfetts erörtert wird, gefolgt von einer Erläuterung des Prüfstands im nachfolgenden Unterkapitel. Im Anschluss werden die Inbetriebnahme des Prüfstands und die Versuchsdurchführung vorgestellt. Abschließend werden die Ergebnisse präsentiert und ein Fazit gezogen.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik bezüglich der verwendeten Schmierfette für Futtermittelpressen dargestellt. Des Weiteren wird die Thematik der Mineralölrückstände in Lebens- und Futtermittel zusammengefasst und die aktuellen Gesetzgebungen dargestellt.

2.1 Mineralöle in Endverbraucherprodukten

Die Kontamination von Lebensmitteln und weiteren Endverbraucherprodukten durch Mineralöle gelangt in den letzten Jahren immer öfter in den Fokus. Das gesellschaftliche und mediale Interesse steigt aufgrund der bisher noch nicht ganzheitlich geklärten gesundheitlichen Folgen für den Verbraucher stetig an. Beispiele der Detektion von Mineralölen in Endverbraucherprodukten sind vielfältig über verschiedene Branchen verteilt. Neben Kosmetika wie Cremes oder Lippenpflegeprodukten /Wen24/ stehen vor allem Lebensmittel im Vordergrund. Mediale Aufmerksamkeit erlangten beispielsweise Mineralöle in Haferflocken /Rat22/ und Speiseölen /Kar22/. Weitere Mineralölrückstände wurden bereits in der Fettphase von Hühnereiern /Gro01/ als auch in dem Fettgewebe von Fleischwaren gefunden. Aber auch vegane Ersatzprodukte wie pflanzliche Brotaufstriche /Bög17/ und vegane Bratwürste /Kre21/ sind zum Teil mit Mineralölen belastet. Weitere Lebensmittel welche häufiger mit Mineralölrückständen kontaminiert sind Süßigkeiten wie Schokolade oder Donuts /Bög17/. In einer Studie des Niedersächsischen Landesamts für Verbraucherschutz wurden verschiedene Lebensmittel auf Bestandteile von gesättigten offenkettigen Kohlenwasserstoffen (MOSH) und Mono- und polyaromatische Kohlenwasserstoffe (MOAH) untersucht. Dabei konnten vor allem deutlich erhöhte Werte an MOSH festgestellt werden /Nie20/. Erwachsene nehmen täglich zwischen 9 und 50 µg pro kg Körpergewicht an gesättigten Kohlenwasserstoffen (MOSH) sowie zwischen 0,4 und 13 µg pro kg Körpergewicht an aromatischen Kohlenwasserstoffen (MOAH) auf. Bei Kindern sind die Werte circa zwei- bis fünfmal so hoch. /Sch23/

Durch die Aufnahme von Mineralölen kommt es im menschlichen Körper zur Anreicherung der Substanzen im Körperfett. Gesättigte offenkettige Kohlenwasserstoffe (MOSH) des Kettenlängenbereichs von circa 10 bis 45 Kohlenstoffatomen werden vom Körper aufgenommen und können in Organen wie Leber, Milz oder Lymphknoten nachgewiesen werden. Tierexperimentelle Untersuchungen haben ergeben, dass es bei einem Rattenstamm (F344-Ratten) zu Ablagerungen und entzündlichen Effekten durch die

Aufnahme von MOSH kommen kann. Die Gefahr für den Menschen ist noch nicht abschließend bewertbar. Jedoch deuten die Versuche darauf hin, dass es auch in menschlichen Organismen zu gesundheitsschädigenden Ablagerungen kommt. Jedoch ist die aktuelle Datenlage unvollständig. Besonders Langzeitstudien und Studien am Menschen bei kontinuierlicher und andauernder Aufnahme fehlen. Eine weitere Produktgruppe welche in Lebensmitteln nachgewiesen wurden sind Mono- und polyaromatische Kohlenwasserstoffe (MOAH). Einige Gruppen von MOAH können erbgutverändernd und krebserzeugend sein. Im Jahr 2023 hat die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) eine Risikobewertung für MOSH und MOAH in Lebensmitteln herausgegeben, aus welcher hervor geht, dass diese Gruppen generell unerwünscht in Lebensmitteln sind /Sch23/.

Die derzeitige Gesetzgebung weist keine Grenzwerte für die Gehalte an Mineralölbestandteilen (MOSH/MOAH) in Lebensmitteln auf. Für die erbgutverändernden und krebserregenden Verbindungen MOAH besteht die Vorgabe, dass diese nicht in Lebensmitteln nachweisbar sein dürfen. Das bedeutet gemäß Standing Committee on Plants, Animals, Food and Feed (SC PAFF) der Europäischen Kommission folgende Grenzwerte /Eur24/:

- 0,5 mg/kg für trockenes Lebensmittel mit niedrigem Fett-/Ölanteil ($\leq 4\%$)
- 1 mg/kg für trockenes Lebensmittel mit niedrigem Fett-/Ölanteil ($> 4\%$ und $\leq 50\%$)
- 2 Milligramm pro Kilogramm Fett/Öl oder Lebensmittel mit einem Fett-/Ölanteil $> 50\%$

Richtwerte für MOSH liegen derzeit nicht vor. Jedoch bestehen Diskussionen darüber Grenzwerte für diese Stoffe zu etablieren. Ein erster Entwurf zu MOSH-Grenzwerten wurde im ersten Gesetzesentwurf aus dem Jahr 2014 der Zweiundzwanzigsten Verordnung zur Änderung der Bedarfsgegenständeverordnung „Mineralölverordnung“ aufgeführt /Bun22/. Dabei lag der vorgeschlagene Grenzwert bei 2 mg/kg für MOSH, welche auf das Lebensmittel übergehen dürfen. Im Jahr 2017 wurde der Grenzwert für MOSH vollständig aus der Verordnung entfernt. Der Entwurf wurde im Jahr 2022 durch den Bundesrat abgelehnt. Es ist jedoch damit zu rechnen, dass Grenzwerte in Zukunft festgelegt werden. Orientierungswerte zu maximalen Mineralölkohlenwasserstoffen in Lebensmitteln existieren bereits von der Länderarbeitsgemeinschaft Verbraucherschutz /Stä21/.

2.2 Ursachen

Die Ursachen für den Eintrag von Mineralölen können vielfältig sein und sind in den meisten Fällen nicht genau erschlossen. Neben vorhersehbaren Einträgen durch Weißöle (Paraffine) zur Herstellung oder Verarbeitung von Lebensmitteln wie Klebstoffe oder Kunststoffe bestehen auch unvorhersehbare Einträge durch Umwelteinträge und sonstige Verunreinigungen. Diese Verunreinigungen können beispielsweise bereits aus Tiernahrung über die Nahrungskette bis zum Endverbraucherprodukt transportiert werden.

2.2.1 Herstellung von Futtermitteln

Circa 27,5 % der Umsätze in der deutschen Landwirtschaft entstehen jährlich durch die Nutztierhaltung /Sta20/. Die hohe Relevanz dieses Sektors führt dazu, dass zu den Themen Tiergesundheits- und Verbraucherschutzinitiativen Strategien entwickelt werden, welche sich für nachhaltige Lebensmittelwertschöpfungsketten einsetzen. Ein exemplarisches Vorhaben stellt dabei die „Farm to Fork“-Strategie /Eur20/ dar, welche eine fairere und nachhaltigere Gestaltung aller Stufen der Lebensmittelwertschöpfungskette, von der Produktion über Vertrieb bis zum Verbrauch, beabsichtigt.

Eine Schlüsselrolle hinsichtlich der Nachhaltigkeit in der Lebensmittelproduktion durch Nutztiere stellen hierbei die verabreichten Futtermittel dar. Bezüglich der produktionsbedingten Ausgaben bildet Futter den größten Anteil (21 %) in der deutschen Landwirtschaft. /Deu20/ Dabei stehen die Futtermittel am Anfang der Lebensmittelwertschöpfungskette. Ein großer Anteil der eingesetzten Futtermittel besteht aus Futtermittelpellets, welche in Pelletpressen aus pulver- und staubförmigen Rohstoffen hergestellt werden. Besonders bei Geflügel werden Futtermittelpellets als Hauptnahrungsmittel eingesetzt. Eine Minderung der Risiken, welche durch die verabreichten Futtermittel hinsichtlich der Tiergesundheit und des Verbraucherschutzes entstehen, ist zum Erreichen einer nachhaltigen Lebensmittelproduktion gemäß der „Farm to Fork“-Strategie ein wichtiger Aspekt. Dementsprechend unterliegt die Verarbeitung und Herstellung der Futtermittel strengen Anforderungen bezüglich der Wahrung des Tierwohls.

Zur Herstellung von Futtermittelpellets werden Pelletpressen verwendet. Der Einsatz von Pelletpressen bewirkt eine Verdichtung des Ausgangsmaterials, den pulver- und staubförmigen Rohstoffen. Aufgrund dessen wird die Dosierbarkeit des Ausgangsmaterials verbessert. Das Pelletpressverfahren basiert auf dem Prinzip des

Endlosstrangpressens. Dabei wird das Futtermittel mit Hilfe von rotierenden Kollern durch eine feststehende Matrize gepresst. Die Ausführung der Lochschablonen der Matrize bestimmen damit den Durchmesser der entstehenden Pellets. Die zur Futtermittelherstellung verwendeten Pressen lassen sich allgemein in zwei Varianten einteilen (**Bild 2-1**). Bei der ersten Variante werden die Pellets in vertikal angeordneten Matrizen gepresst. Es wird dabei die antreibende Welle mit einer Kraft belastet, welche die Koller auf die Matrize drückt. Die zweite Variante sind die Pelletpressen mit Ringmatrizen und horizontal ableitende Scheibenmatrizen (vgl. Bild 2-1). Bei dieser Bauform wird die Anpresskraft über den Widerstand des zu pressenden Materials eingestellt.

Aufgrund der Möglichkeit einer situativen Anpassung der Anpresskräfte bei unterschiedlichen Futtermittelarten wird in der Futtermittelindustrie überwiegend die Form der Kollergangpresse mit Scheibenmatrize gewählt.

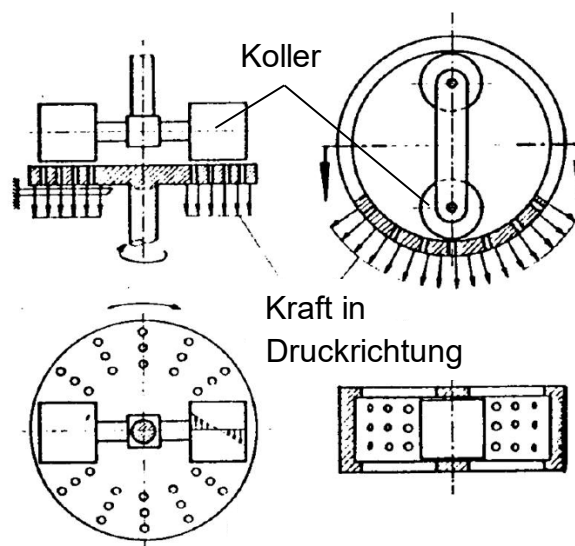


Bild 2-1: Kollergangpresse mit Scheibenmatrize (links) / Kollergangpresse mit Ringmatrize (rechts) /Dör11/

In **Bild 2-2** ist eine Schnittdarstellung einer Pelletpresse mit Scheibenmatrize dargestellt. Die Krafteinleitung radial auf die antreibende Königswelle geschieht hydraulisch über eine sogenannte Hydraulikmutter. Der Ausgangsstoff wird unter Zuhilfenahme von Kollern durch eine Matrize gepresst. Es werden meistens mehrere Kollerrollen über eine Welle angetrieben. Es werden Hersteller- und Größenabhängig zwei bis fünf Koller eingesetzt. Die durch die Hydraulikmutter aufgeprägte Kraft stützt sich in diesem Fall vollständig über die Kollerrollen auf der Matrize ab. Im Rahmen des Pressprozesses erfolgt

kein direkter Kollerantrieb, stattdessen findet ein Antrieb der Koller durch Abrollen auf der Matrize statt. Der Prozess der Pelletherstellung beginnt mit dem Transport des Ausgangsmaterials durch Leitschaufeln in den Verdichtungsraum. Die rotierende Matrize übernimmt den Transport des Materials, welches zwischen Koller und Matrize geleitet wird. Das Material wird folglich durch die Matrize in den Verdichtungsraum zwischen Koller und Matrize gepresst, wo es am Austritt durch den Abscheider in Pellets geschnitten wird.

Eine Kollerrolle ist jeweils über zwei Kegelrollenlager in O-Anordnung auf einer Welle gelagert. Die Wälzlager nehmen die Kräfte in radialer Richtung auf und gewährleisten die rotatorische Bewegung der Kegelrollen und deren Abrollen auf der Matrize. Zur Minderung der Reibung und des Verschleißes des Wälzlagers werden die tribologischen Kontakte zwischen den Wälzkörpern und den Lagerschalen mit Fett geschmiert. Die starken mechanischen und thermischen Belastungen des Schmierfettes lassen eine Lebensdauerschmierung in diesen Anlagen nicht zu. Deshalb muss dem Lager regelmäßig neues Fett zugeführt werden. Die Schmierfettzufuhr wird durch eine Zentralschmieranlage gewährleistet, welche in geregelten Abständen frisches Schmierfett in den Lagerraum fördert. Das gebrauchte Schmierfett wird aufgrund des Verlustes seiner initialen physikalischen Eigenschaften aus dem tribologischen Kontakt zwischen Wälzkörper und Lagerschalen gefördert. Aufgrund der konstruktiven Beschaffenheit der Pelletpressen ist eine vollständige Trennung der Wälzlager und des Prozessraums nicht möglich. Eine konstruktive Anpassung der Anlagen ist für viele (landwirtschaftliche) Betriebe nicht wirtschaftlich. Schlussfolgernd gelangt funktionsbedingt das Schmierfett in den Prozessraum und somit in das zu verarbeitende Futtermittel. Es kann hierbei von einem kontinuierlichen und vorhersehbaren Kontakt des Schmierstoffes mit dem Produkt ausgegangen werden.

Die Firma KAJO GmbH vertreibt Schmierfette an Betreiber von Futtermittelpressen. Aus den vertriebenen Mengen an die jeweiligen Pelletpressenbetreiber lässt sich abschätzen wie viel Schmierfett pro Stunde nachgefördert wird. Bei einer durchsatzbezogenen mittleren Pelletpresse liegt die durchschnittliche Nachfüllmenge bei 60 g/h bei einem mittleren Durchsatz von 800 kg/h Futtermittel. Das bedeutet, dass durchschnittlich 75 mg Schmierstoff in einem Kilogramm Futtermittelpellets gebunden werden, da der Schmierstoff nicht anderweitig abgeführt wird.

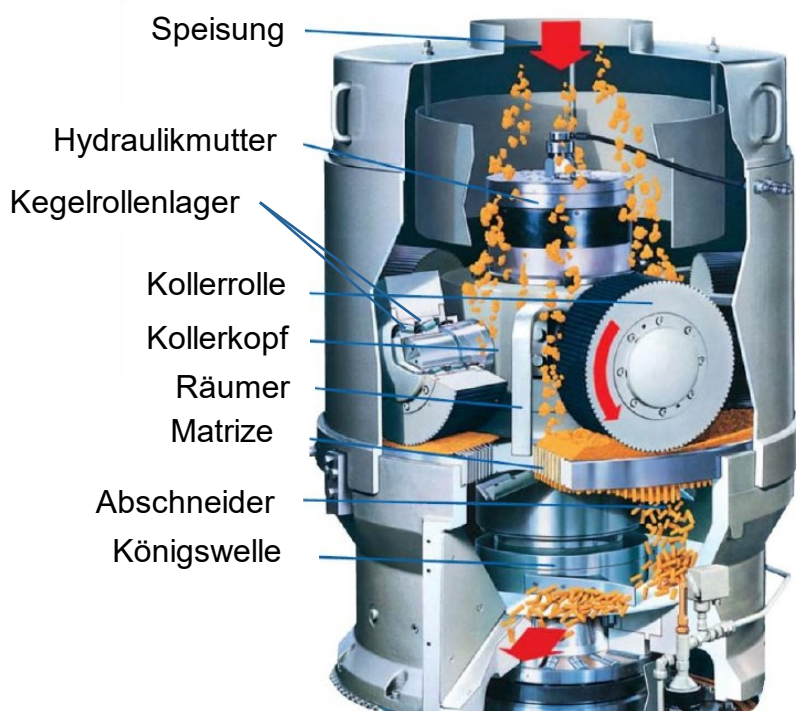


Bild 2-2: Schematische Darstellung einer Pelletpresse mit Scheibenmatrize /Pet12/

2.3 H1-Schmierstoffe

Zur Schmierung der Wälzlager in Pelletpressen für die Futtermittelindustrie sind allein Schmierfette gemäß ISO 21469:2006 /CEN06/ zugelassen. Diese H1-Schmierstoffe sind für Maschinen und Anlagen in der Lebensmittel- und Futtermittelindustrie vorgesehen. Die in den USA angesiedelte Food and Drug Administration (FDA) hat eine Positivliste für Inhaltstoffe von H1-Schmierstoffen festgelegt. Die fertig formulierten Schmierstoffe werden durch die NSF International (National Sanitation Foundation) geprüft und für die Verwendung als H1-Schmierstoff freigegeben. Diese Regelungen haben weltweite Relevanz, da Schmierstoffe für die Lebensmittelindustrie durch die Kriterien der Amerikanischen Organisationen geprüft und gekennzeichnet werden.

In Bild 2-3 ist die prozentuale Zusammensetzung der Bestandteile von Schmierfetten dargestellt. Der Hauptbestandteil ist das Grundöl mit bis zu 95 %. Zur Herstellung von H1-Schmierstoffen werden häufig sogenannte Paraffine als Grundöl eingesetzt. Es handelt sich dabei um Mineralöle, welche hochgradig durch eine Vakuumdestillation von überwiegend Erdöl gewonnen werden. Dabei entsteht ein Gemisch aus azyklischen Alkanen (gesättigte Kohlenwasserstoffe). Diese chemischen Verbindungen enthalten

offenkettige Kohlenwasserstoffe und bilden keine Ringstrukturen aus. Es handelt sich dabei um gesättigte Mineralölkohlenwasserstoffe, welche zu der zuvor erwähnten MOSH-Fraktion gehören.

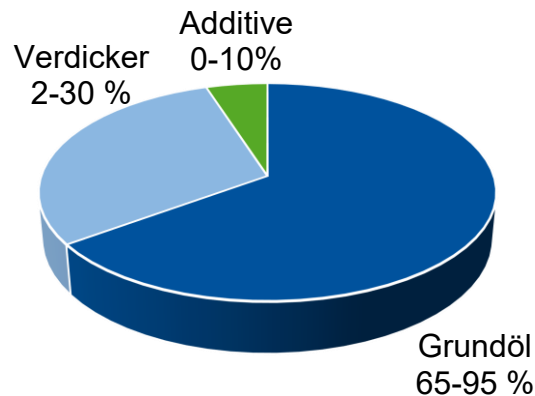


Bild 2-3: Zusammensetzung Schmierfett /Man17/

Die Norm ISO 21469:2006 legt Hygieneanforderungen für die Formulierung, Herstellung, Verwendung und den Umgang mit Schmierstoffen fest. Dies gilt für Schmierstoffe mit einem unvorhersehbaren Kontakt mit Produkten und Verpackungen in der Lebensmittel-, Kosmetik-, Arzneimittel-, Tabakwaren- oder Tierfutterindustrie. Gemäß der im vorherigen Kapitel dargestellten Gegebenheiten zur Schmierung der Wälzlager in Pelletpressen kann in diesem Fall von einem kontinuierlichen und vorhersehbaren Produktkontakt ausgegangen werden. Wie zuvor beschrieben, kann davon ausgegangen werden, dass pro Kilogramm Futtermittel Mineralöle in einem höheren zweistelligen Milligrammbereich beim Pressen der Futtermittelpellets übergehen.

3 Entwicklung eines Bio-Schmierfettes zum Einsatz in Futtermittelpressen

In diesem Kapitel wird die Entwicklung des Bio-Schmierstoffes vorgestellt. Dazu werden zuerst die Auswahl der Grundstoffe und die relevanten Aspekte bezüglich Lebensmittel- und Futtermittelsicherheit vorgestellt. Anschließend werden die chemischen Grundlagen der Formulierung des Schmierstoffes vorgestellt und die grundlegenden chemischen Verbindungen und Reaktionen dargelegt, welche bei der Herstellung des Schmierstoffes von Bedeutung sind. Danach folgt die Beschreibung und Analyse durchgeführter Labortests zur Qualifizierung der physikalischen und rheologischen Eigenschaften des Schmierfettes. Hierzu geschieht auch eine vergleichende Darstellung zu konventionell eingesetzten mineralölbasierten H1-Schmierfetten auf Paraffinbasis.

3.1 Auswahl geeigneter Inhaltstoffe

Die in Kapitel 2.2 aufgezeigte Kontaminierung von Futtermittelpellets durch Mineralöle kann mit Hilfe der Substitution, der derzeit eingesetzten mineralölbasierten H1-Schmierfette durch einen Bio-Schmierstoff vermieden werden. Dies dient vor allem dem Schutz der Nutztiere sowie der Vermeidung von Lebensmittelkontaminationen durch Mineralöle. Die derzeit bestehende Grauzone durch die Einordnung der verwendeten Schmierstoffe zu Produkten mit unvorhersehbarem Produktkontakt kann durch die Verwendung neuartigen Bio-Schmierfettes beseitigt werden. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen Inhaltstoffe gewählt werden, welche eine Toxizität des Schmierstoffes ausschließen.

3.1.1 Grundöl

Die Hauptkomponente von Schmierfetten ist das Grundöl (siehe Bild 2-3). Einige Eigenschaften des Schmierfettes werden durch die Art sowie Viskosität des Grundöls beeinflusst. Steigende Viskosität verbessert zum Beispiel das Haftvermögen, die Korrosionsschutzeigenschaften und die Resistenz gegen Wasser. Auf der anderen Seite wird die Förderbarkeit des Fettes ungünstiger. /Kla82/

Für das neuartige Bio-Schmierfett wird entsprechend ein Grundöl auf Basis nachwachsender Rohstoffe gewählt, welches auf der LuSC-Liste /EU 19/ aufgeführt ist. Aufgrund der nachgewiesenen technischen Eignung wird dazu ein synthetischer Ester aus nachwachsenden Rohstoffen gewählt. Synthetische Ester haben den Vorteil gegenüber

nativen Estern, dass sie eine bessere Alterungsstabilität gegenüber Oxidationsprozessen aufweisen. Native Ester weisen ungesättigte Fettsäuren auf, die anfällig für eine radikalische Oxidation des Schmierstoffs durch Luftsauerstoff sind. Hohe Temperaturen beschleunigen die Alterungsvorgänge, sodass diese nicht geeignet sind für den Einsatz in Pelletpressen, in denen durch die auftretende Reibung Temperaturen von mehr als 90 °C auftreten können. Bei synthetischen Estern können diese Schwachstellen durch die Modifizierung der Ausgangsprodukte eliminiert werden. Dadurch wird die Alterungsbeständigkeit des neuartigen Bio-Schmierstoff vergleichbar mit Mineralölen. Aufgrund der Variation der Ausgangsprodukte des synthetischen Esters lassen sich für die Anwendung angepasste Eigenschaften des Grundöls erzeugen.

3.1.2 Verdicker

Das Grundöl wird in dem Verdicker, welcher aus feinen Partikeln eine feinporige Struktur ausbildet in den Hohlräumen gebunden. Der Verdicker stellt einen Vorratsreservoir für das Grundöl dar und ist zuständig für eine dosierte Ölabgabe. Die Bindung besteht durch verschiedene Wechselwirkungen zwischen Grundöl und Verdicker. Zum einen entstehen molekulare Anziehungskräfte zwischen dem Verdicker und den polaren Grundölkomponenten. Zum anderen folgt durch Kapillarkräfte ein mechanischer Einschluss des Öls in dem schwammartigen Gerüst des Verdickers. Die Wahl des Verdickers bestimmt größtenteils das Fließverhalten des Fettes. Der Verdicker beeinflusst zudem das Haftvermögen des Schmiermittels an der Oberfläche.

Schmierfette können verschiedene Strukturen besitzen, die auf die Mikrostrukturen des Verdickers zurückgeführt werden können. Je feiner das mikrokristalline Netzwerk ist, desto größer ist das Eindickungsvermögen. Metallseifenverdicker sind Salze metallischer Kationen und organischer Anionen. Die Herstellung im Grundöl erfolgt durch eine Verseifungsreaktion eines Metallhydroxides mit einer organischen Säure. Metallseifenverdicker liegen meist in Fibrillenform vor.

Die meisten technischen Schmierfette zum Einsatz in Wälzlagern sind auf Basis von Lithium, welches entweder aus Gestein abgebaut oder aus Salzseen gewonnen wird. Die Abbauggebiete sind zumeist in Südamerika vorzufinden, wo hochkonzentriertes Lithium vorhanden ist. Der Abbau von Lithium steht unter Verdacht korrupt zu sein /Bau23/. Zum einen durch Landnutzungskonflikte und durch nicht nachhaltige Abbauverfahren. Zudem steht die Schmierstoffproduktion in Sachen Lithium in Konkurrenz mit

der Automobilindustrie, welche Lithium zur Herstellung von Batterien benötigt. Dadurch ist die Nachfrage in den letzten Jahren deutlich gestiegen.

Mit Hinblick auf eine nachhaltige Produktion und Herstellung des im Projekt zu entwickelnden Schmierfett wurde deshalb evaluiert, für den Verdicker auf lokal verfügbare Ressourcen zurückzugreifen. Aus diesem Grund wird für das Bio-Schmierfett in diesem Projekt auf Calcium als Verdicker zurückgegriffen. Dieses wird in Kalkstein abgebaut, welcher in großen Reserven verfügbar ist. Die Unterschiede verschiedener Verdicker sowie Grundöle und deren Auswirkungen auf die Anwendung werden im nachfolgenden Kapitel aufgezeigt.

3.2 Formulierung und Herstellung

Die Eigenschaften eines Schmierfettes hängen neben den Inhaltsstoffen entscheidend von den Parametern des Herstellungsprozesses ab. Aufgrund der großen Flexibilität bei der Herstellung von Schmierfetten werden diese häufig diskontinuierlich hergestellt. Die Verfahrensschritte werden hauptsächlich durch den Verdicker bestimmt. Bei herkömmlichen Seifenschmierfetten werden die Schritte durchlaufen, welche in **Bild 3-1** dargestellt sind. Zuerst werden die zu verseifenden oder neutralisierenden Rohstoffe im Grundöl dispergiert. Anschließend folgt der Zusatz der in Wasser suspendierten oder gelösten Hydroxide. Es folgt die Erhitzung zur Beschleunigung der Verseifungsreaktion (a). Dehydratisierung der Dispersion der Seife durch zusätzliche Temperaturerhöhung bei Ölzusatz (b). Kristallisation der Seife durch Abkühlung (c). Einarbeitung der Additive bei leichter Erhitzung (d). Anschließend folgt die Homogenisierung des Schmierfettes. Danach wird je nach Bedarf die Konsistenz des Schmierstoffes durch Zugabe von Öl eingestellt werden. Abschließend wird das Fett abgekühlt, filtriert und entlüftet und in Gebinde abgefüllt (e).

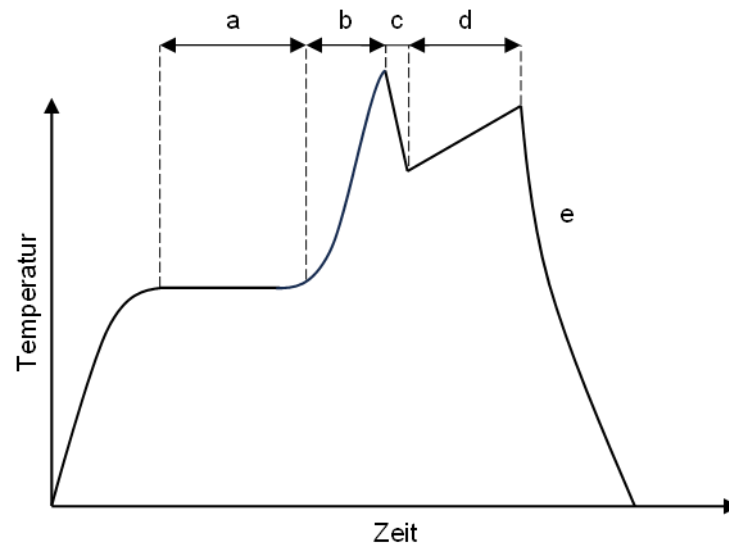


Bild 3-1: Klassisches Temperaturprofil bei der Schmierstoff Herstellung a) Verseifung; b) Entwässerung; c) Abkühlung; d)Wiedererhitzung; e) Abkühlung und Rühren /Kla82/

Für das neuentwickelte Bio-Schmierfett wurde im Labormaßstab ein zweistufiges Verfahren entwickelt, um ein Calciumsulfonatschmierfett rein auf der Basis nachwachsender und biologisch leicht abbaubarer Ester herzustellen.

Im Teilschritt 1 wird zunächst ein überbasisches Calciumsulfonat in einem Ester als Grundöl hergestellt. Die erste Herausforderung dieses Teilschritts stellt die Reaktion von Alkylbenzoesulfonsäure, Calciumhydroxid, Calciumoxid und Wasser unter Temperaturkontrolle im Ester dar. Wird der Ester thermisch zu stark belastet, würde dieser im Reaktionsansatz verseifen und der Ansatz müsste verworfen werden. Im nachfolgenden Schritt muss in diese Mischung in effizienter Weise CO_2 eingetragen werden. Das Kohlendioxid reagiert mit dem im Überschuss vorhandenen Calciumhydroxid, so dass Calciumcarbonat-Mizellen entstehen. Diese werden durch das in der Mischung vorhandene Calciumsalz (Calciumstearat) der Alkylbenzolsulfonsäure ummantelt und in „Lösung“ gehalten (**Bild 3-2**).

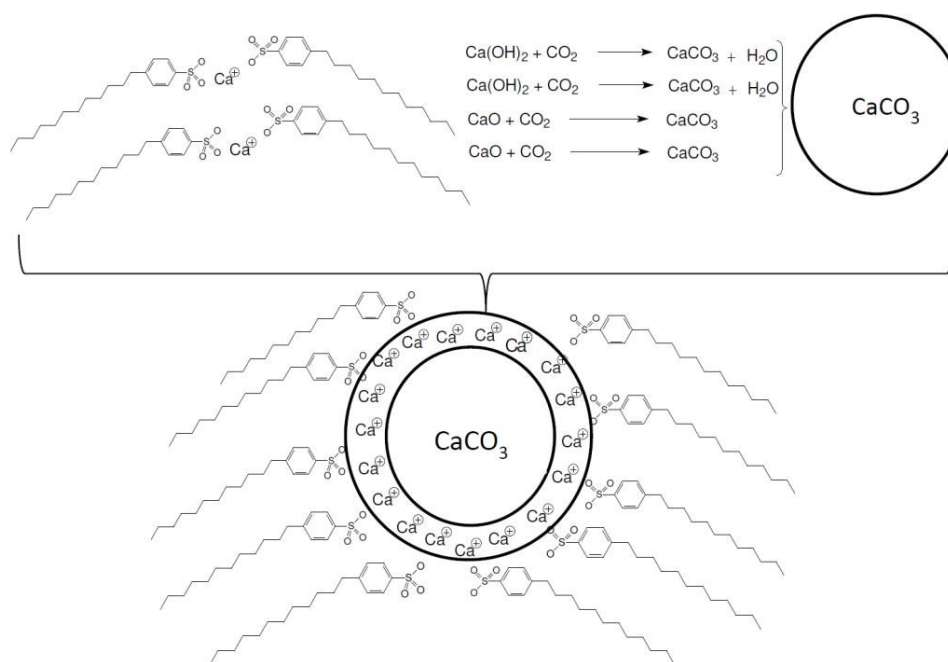


Bild 3-2: Teilschritt 1 Herstellung Schmierfett: Herstellung überbasisches Calciumsulfonat unter konstanter Temperatur.

Sofern Kohlendioxid aus Abgasen beispielsweise von Industrieunternehmen genutzt wird, kann durch dieses Verfahren klimaschädliches Kohlendioxid in Calciumcarbonat umgewandelt und eine Emission in die Atmosphäre verhindert werden. Das Verfahren hat demnach das Potential, einen Beitrag zur CO_2 -Konversion zu leisten, die für das Entgegenwirken der Klimaerwärmung erforderlich ist. Im zweiten Teilschritt wird das zuvor hergestellte überbasische Calciumsulfonat unter Zusatz weiterer organischer Säuren (12-Hydroxystearin- und Essigsäure), Wasser und einer Temperaturerhöhung in ein Calciumsulfonatschmierfett umgewandelt (**Bild 3-2**). Entscheidend für den Verdickungsprozess ist die Umwandlung des amorph vorliegenden Calciumcarbonats (Vateritform) in die kristalline Form (Calcit) (**Bild 3-3**).

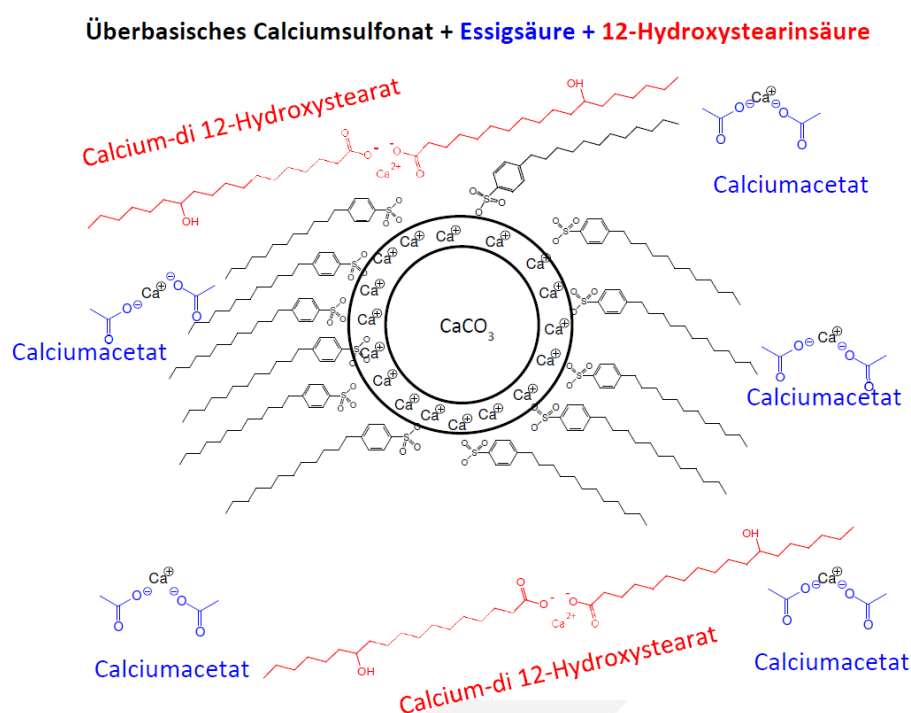


Bild 3-3: Teilschritt 2 Herstellung Schmierfett. Umwandlung Grundöl in Calciumsulfonatschmierfett

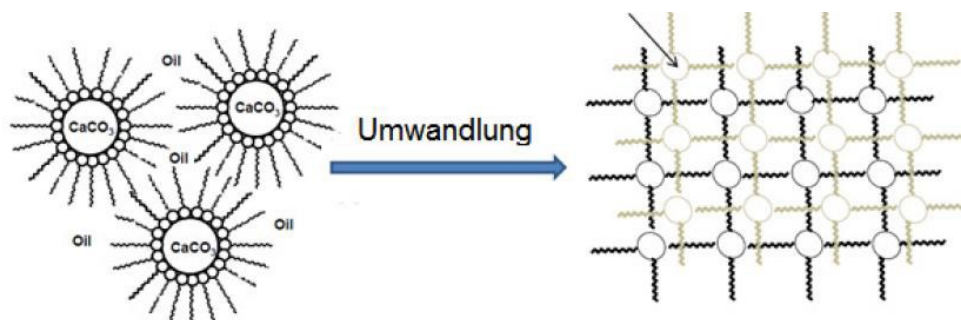


Bild 3-4: Umwandlung des CaCO_3 von der Vaterit- in die Calcit-Form

Zwischen den häufig eingesetzten Fetten auf Basis von Lithium und den im Projekt eingesetzten auf Calcium basierten Schmierfett bestehen Unterschiede in der mikroskopischen Struktur (**Bild 3-5**). Lithium bildet eine Verdickerstruktur in Form eines feinen Fibrillennetzwerkes aus, wohingegen Calcium kristalline Formen ausbildet. Der kristalline Calcit besteht aus dünnen Calcitschichten bzw. Calciumcarbonatscheiben mit einem großen Oberflächen-Volumen-Verhältnis, welche eine große Oberflächenaktivität aufweisen /Som15/. Den Einfluss der unterschiedlichen chemischen Struktur auf die Leistungsfähigkeit in Wälzlagern für Pelletpressen gilt es in diesem Projekt zu analysieren. /Bos18/

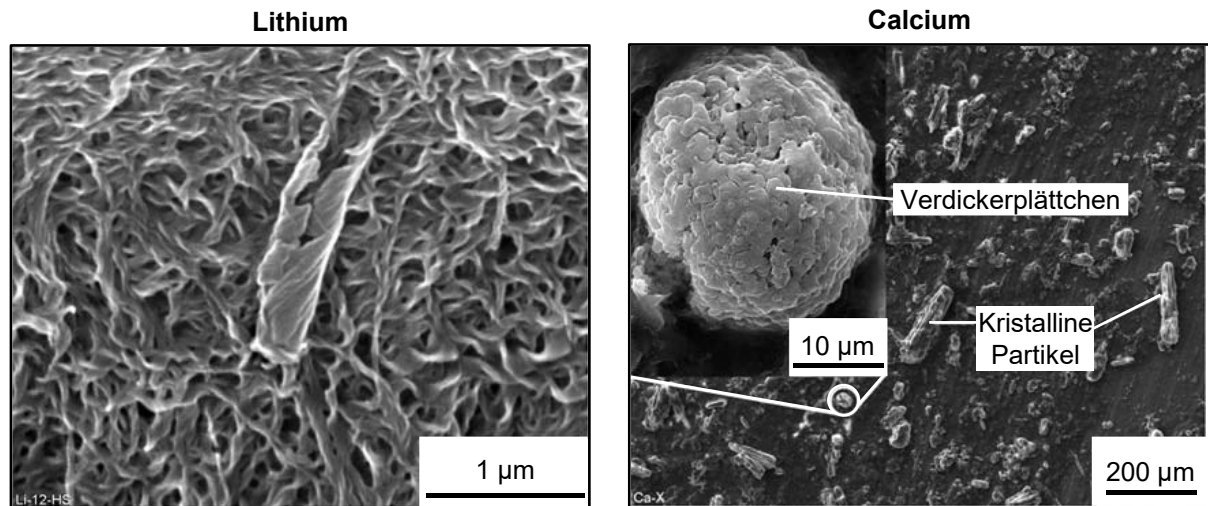


Bild 3-5: Verdickerstruktur von Lithium und Calcium im Vergleich /Som15/

Die Herstellung des Produktes begann im Labor, wo mit simplen Anlagen ein Schmierfett in kleinen Mengen produziert werden konnte. Anschließend hat die Kajo GmbH eine Pilotanlage in eigener Regie mit unterstützender Hilfe des ifas der RWTH Aachen University aufgebaut. Das Einleiten des CO₂ in die Calciumseife erwies sich bereits im Labormaßstab als Herausforderung, da ein Teil des CO₂ aus der Seife unter Blasenbildung entweicht. Hieraufhin wurde in der Pilotanlage der Kessel verschlossen. In den Kessel wurden Rührwerke, Wandabstreifer sowie eine Pumpe eingebaut, welche das CO₂ aus dem oberen Teil nach unten fördert, um es erneut in die Seife einzuleiten, bis das CO₂ komplett durchreagieren konnte. Der Pilotkessel hat eine Kapazität von ca. 1.500 kg, so dass die notwendigen technischen Untersuchungen durchgeführt werden konnten. Die Anforderungen des Projektes sehen vor, dass die Grundflüssigkeit ausschließlich aus gesättigten Estern aus nachwachsenden Rohstoffen besteht. Daneben werden Additive für die Erfüllung der technischen Anforderungen benötigt. Diese Additive werden üblicherweise in Mineralöl gelöst. Dieser Sachverhalt soll aufgrund der Lebensmittelverträglichkeit des Produktes geändert werden, sodass die Additive in synthetischen Estern gelöst werden. Dadurch wird erzielt, dass das Endprodukt vollkommen frei von Mineralölen ist und sich insbesondere für die Lebensmittelindustrie eignen wird. Es wird vorerst geprüft, ob das hergestellte Produkt, welches eine hohe Haftfähigkeit aufweist, über die Zentralschmieranlagen den Wälzlageren zugeführt werden kann. Des Weiteren ist nicht bekannt, inwieweit die Filmstärke einen Einfluss auf die Wälzlager-schmierung hat. Es wird angenommen, dass die Filmdicke durch die große Haftfähigkeit des Produktes größer ist als bei Schmierstoffen auf Mineralölbasis. Diese offenen

Punkte werden durch experimentelle Untersuchungen im entwickelten Wälzlagerprüfstand ausführlich getestet.

3.3 Labortests

Zur Qualifizierung der technischen Leistungsfähigkeit und der physikalischen Eigenschaften des neuentwickelten Bio-Schmierfettes wurden standardisierte Prüfverfahren durchgeführt, welche entsprechend mit einem Schmierfett mit Mineralöl als Grundöl und einem Lithiumverdicker abgeglichen wurden. Hierbei ist von besonderer Bedeutung Eigenschaften zu erzielen, welche vergleichbar mit herkömmlichen mineralölbasierten Schmierfetten für Pelletpressen sind. Die durchgeführten Testverfahren und die erzielten Ergebnisse werden im nachfolgenden vorgestellt.

3.3.1 Ruhepenetration und Walkpenetration (ASTM D 217) /AST21a/

Mit Hilfe der Ruhepenetration und der Walkpenetration wird die Verformbarkeit (Konsistenz) des Schmierfettes bestimmt. Dazu dringt ein genormter Konus in eine definierte Menge Fett ein. Dabei wird die erzielte Eindringtiefe des Konus nach 5 Sekunden gemessen. Die Messtemperatur beträgt 25 °C. Für die Walkpenetration wird das Schmierfett vor der Messung mit 60 Doppelhüben in einem Schmierfettwalker mechanisch belastet. Dem unterliegt der Zweck, das Frischfett mechanisch zu belasten und so die Konsistenz des ungebrauchten Fettes, dem des in Gebrauch befindlichen Fettes anzunähern. Durch Messung der Konsistenz lassen sich die Schmierfette in Konsistenzklassen einordnen, sogenannte NGLI (National Lubrication Grease Institute) - Klassen. Wälzlagerfette liegen in der Regel zwischen einer Eindringtiefe von 17,5 mm (NGLI 4) und 34,0 mm (NGLI 1). Die gemessene Eindringtiefe wird in der Einheit 0,1 mm angegeben.

Die Ruhe- sowie Walkpenetration beider untersuchten Schmierfette liegen im Bereich der NLGI-Klasse 2 (265-295 1/10 mm). Diese Konsistenzklasse wird charakteristisch für die Anwendung in Wälzlagern eingesetzt. Bei dem Bio-Schmierfett ist die Differenz zwischen Ruhe- und Walkpenetration mit 8 1/10 mm wesentlich geringer als bei dem Lithium-Schmierfett (30 1/10 mm). Dies lässt darauf schließen, dass die Konsistenz des Bio-Schmierfetts weniger von der mechanischen Belastung beeinflusst wird.

Tabelle 3-1: Ruhepenetration und Walkpenetration nach ASTM D 217

	Ruhepenetration [1/10 mm]	Walkpenetration [1/10mm]
Bio-Schmierfett	275	283
Lithium-Schmierfett	265	295

3.3.2 Tropfpunkt (ASTM 2265) /AST22/

Schmierfett wird zumeist an Stellen eingesetzt, in denen Schmieröle herauslaufen und nicht örtlich fixiert werden können. Grundvoraussetzung dafür ist, dass der Schmierstoff an diesen Stellen haften bleibt und sich im Einsatz nicht verflüssigt. Andernfalls kommt es zu einer Mangelschmierung und zwangsläufig zu Schäden an der Maschine. Daher gilt es, den Tropfpunkt eines Fettes zu beachten, um das Verflüssigen des Fettes bei der nötigen Einsatztemperatur zu verhindern. Der Tropfpunkt bezeichnet die Temperatur, bei der sich der sich das Schmierfett verflüssigt und „zu tropfen“ beginnt.

Das Bio-Schmierfett weist mit einem Tropfpunkt von 300 °C eine deutlich höhere thermische Beständigkeit auf als das Lithium-Schmierfett (180 °C). Die Betriebstemperaturen in den Pelletpressen für die Futtermittelindustrie werden mit 150 °C angenommen, wobei beide Schmierfette eine ausreichende thermische Stabilität für diese Anwendung aufweisen.

Tabelle 3-2: Tropfpunkt nach ASTM 2265

	Tropfpunkt
Bio-Schmierfett	300 °C
Lithium-Schmierfett	180 °C

3.3.3 Grundölviskosität (ASTM D 7042) /AST21b/

Die Viskosität des Grundöls wird vor der Verarbeitung des Schmierfettes messtechnisch erfasst. Dafür wird ein Rotationsviskosimeter verwendet, dabei wird ein Probekörper in dem Grundöl in Rotation versetzt und der entsprechende Widerstand des Fluids gemessen. Daraus lässt sich die kinematische Viskosität der Grundöle bestimmen, welche in Tabelle 3-3 dargestellt ist. Für das Bio-Schmierfett wurde eine höhere Grundölviskosität gewählt zur Optimierung der Tragfähigkeit des Esters. Die Viskosität synthetischer Ester

ist deutlich weniger abhängig von dem aufgeprägten Druck als bei Mineralöl. Das bedeutet, dass die Gefahr besteht, dass in hoch belasteten tribologischen Kontakten ein nicht ausreichender Schmierfilm bei der Verwendung eines Esters gebildet wird, was zu einem höheren Verschleiß führen würde. Dieses Verhalten konnte in vorherigen Untersuchungen bereits bestätigt werden /Deu22/. Die Wahl einer höheren Grundviskosität kann dieses Problem minimieren.

Tabelle 3-3: Kinematische Viskosität nach ASTM D 7042

	Kinematische Viskosität bei 40 °C
Bio-Schmierfett	320 mm ² /s
Lithium-Schmierfett	190 mm ² /s

3.3.4 SKF-EMCOR-Verfahren (DIN 51802) /DIN17/

Mit dem SKF-Emcor Prüfverfahren werden die korrosionsverhindernden Eigenschaften der Schmierfette geprüft. Dies geschieht in Pendelkugellagern unter Zugabe von Wasser unter vorgeschriebenen Prüfbedingungen. Der Prüfzyklus besteht aus ein Drittel Prüflauf und zwei Drittel Stillstand der Lager und beträgt insgesamt 164 h. Der Korrosionsgrad wird nach der Prüflaufzeit durch eine Sichtprüfung der Prüflager-Außenringe definiert.

Das lithiumbasierte Schmierfett wies keine Korrosion auf. Bei dem Bio-Schmierfett traten bei einem Lager leichte Spuren von Korrosion auf. Wohingegen das zweite Lager unverändert war. Durch die geringe Korrosionsneigung ist die Beständigkeit des Bio-Schmierfett für den Einsatz in Pelletpressen ausreichend gegeben.

Tabelle 3-4: Korrosionsgrad nach DIN 51802

	Korrosionsgrad
Bio-Schmierfett	0-1
Lithium-Schmierfett	0-0

3.3.5 Water Washout (ASTM D 1264) /AST18/

Der Water-Washout Test nach ASTM-Testmethode D1264, ist eine Methode zur Messung der Fähigkeit eines Schmierfettes seine Funktion zu gewahren und die Auswaschung durch Wasser von einem Lager zu identifizieren. Die Probe wird dazu entweder untergetaucht oder mit einem Wasserstrahl besprüht.

Der Wasserauswaschungstest misst den Prozentsatz der Fettentfernung innerhalb eines bestimmten Zeitraums. Die Ergebnisse des Tests werden bei der Auswahl des Schmierfettes berücksichtigt, um die Lebensdauer einer Maschine zu verlängern, da Maschinen im Freien weniger häufig ausgetauscht und repariert werden müssen. Wenn Lager dem Wasser ausgesetzt sind, kommt es vermehrt zu mechanischen Ausfällen durch Korrosion, Oxidation, Rost oder Lagerausfall. Diese mechanischen Ausfälle können teilweise mit wasserfestem Fett vermieden werden, das besser an den Oberflächen haftet und bestimmte Korrosions- und Rostschäden verhindern kann. Der Verlust an Schmierfett wird nach dem Test prozentual angegeben. Das Testprozedere wird für eine Stunde bei einer Temperatur von 79 °C durchgeführt.

Die Ergebnisse für die beiden Schmierfette sind in **Tabelle 3-5** dargestellt. Dabei erreicht das Bio-Schmierfett eine um 1,6 % geringere Auswaschung durch Wasser als das Lithium-Schmierfett. Die Beständigkeit zum Einsatz in Pelletpressen ist aufgrund der erzielten Messergebnisse gegeben.

Tabelle 3-5: Water-Washout Test nach ASTM D 1264

	Water-Washout (79 °C/1 h)
Bio-Schmierfett	3,7 %
Lithium-Schmierfett	5,3 %

3.3.6 Vierkugel-Apparat (DIN 51350-4) /DIN15/

DIN 51350-4 beschreibt das Prüf- und Auswerteverfahren von Schmierfetten mit Hilfe des Vierkugel-Apparates. Ermittelt wird die Gut- und Schweißkraft von konsistenten Schmierstoffen. Der Schmierstoff wird dazu in einem Vierkugelsystem geprüft, dass aus einer rotierenden Kugel (Laufkugel) besteht, die auf drei ihr identischen Kugeln (Standkugeln) gleitet. Die Schweißkraft beschreibt dabei die gemessene Prüfkraft in

Newton bei der ein Verschweißen der Kugeln eintritt. Die Gutkraft ist die Kraft, bei welcher noch kein Verschweißen auftritt. Die Messdaten lassen Aussagen über die allgemeine Verschleißreduktion des jeweiligen Schmierstoffes im Mischreibungszustand zu und die Wirksamkeit entsprechender Additive in dem Reibungszustand.

In Tabelle 3-6 sind die Ergebnisse der Untersuchungen im Vierkugel-Apparat bei Verwendung des Bio-Schmierfettes und des Lithium-Schmierfettes dargestellt. Die Lasten bei Verwendung des Bio-Schmierfettes sind wesentlich höher als bei dem Lithium-Schmierfett. Dies ist auf die unterschiedliche Verdickerstruktur zurückzuführen (vgl. Bild 3-5). Weiterhin weist das polare esterbasierte Grundöl eine hohe Oberflächenaffinität auf, wodurch die Benetzungsfähigkeit höher ist als bei Mineralöl. Zudem ist die Grundölviskosität des Esters höher. Jedoch ist die Aussagekraft des Tests nur begrenzt auf die tribologischen Gegebenheiten bei der Verwendung des Fettes als Wälzlagerfett ableitbar.

Tabelle 3-6: Messergebnisse nach DIN 51350-4

	Gutlast	Schweißlast
Bio-Schmierfett	4800 N	5000 N
Lithium-Schmierfett	2600 N	2800 N

3.3.7 Ölabscheidung (DIN 51817) /DIN14/

Das Prüfverfahren nach DIN 51817 dient der Bestimmung der Ölabscheidung von Schmierfetten unter statischen Bedingungen.

Damit lässt sich allgemein auf die Neigung des Schmierfettes zur Ölabscheidung unter Lagerungsbedingungen schließen. Dazu wird eine definierte Menge Fett über einen längeren Zeitraum mit einem Gewicht belastet. Anschließend wird die aus dem Schmierfett separierte Menge Fett erfasst. Die Prüfprozedur gibt Richtwerte bezüglich der Ölabgabe in der Lagerstelle oder in Zentralschmieranlagen. Das Ergebnis wird relativ zur Fetteinwaage in % angegeben.

Die Ölabscheidung des Lithium-Schmierfettes ist 4,75 x höher als jene des Bio-Schmierfettes, was durch die Struktur des Verdickers und die Affinität des Grundöles erläutert werden kann. In späteren Versuchen muss evaluiert werden, ob die Ölabscheidung

ausreichend ist, um die tribologischen Kontakte der Wälzlager zu benetzen oder ein Teil des Schmierfettes ohne Ölabgabe aus dem Kontakt gefördert wird.

Tabelle 3-7: Messergebnisse nach DIN 51817

	Ölabscheidung nach 168 h und 40 °C
Bio-Schmierfett	0,4 %
Lithium-Schmierfett	1,9 %

3.3.8 Fließdruck (DIN 51805) /DIN16a/

Der Fließdruck beschreibt den Differenzdruck zum atmosphärischen Druck, welcher erforderlich ist, um das Fett durch eine in der DIN 51805 festgelegte Prüfdüse zu pressen. Das Messverfahren gibt eine Aussage über die Konsistenz eines Schmierstoffes und gibt das Fließverhalten bei kleinen Scherraten an. Der Fließdruck ist besonders bedeutend für die Förderbarkeit des Schmierfettes durch beispielsweise pneumatische Kolbenpumpen, welche zum Nachfördern von Schmierfett benutzt werden.

Der Fließdruck der Schmierfette, welche in diesem Projekt betrachtet wurden, wurde bei relativ tiefen Temperaturen ermittelt, um das Fließverhalten für Anlagen im Winter zu analysieren. Durch die geringe Abhängigkeit des synthetischen Esters von der Temperatur bei dem Bio-Schmierfett ist der Widerstand durch Reibung geringer als bei dem paraffinbasierten Lithiumfett. Das Bio-Schmierfett weist trotz geringerer Prüftemperatur einen geringeren Fließdruck auf als das Lithium-Schmierfett.

	Fließdruck
Bio-Schmierfett	675 mbar (-35 °C)
Lithium-Schmierfett	925 mbar (-30 °C)

4 Konstruktion und Entwicklung eines Prüfstandes zur Abbildung der Randbedingungen in Pelletpressen

In diesem Kapitel wird der Prozess der Entwicklung eines Prüfstandes zur Evaluierung der Leistungsfähigkeit des neu entwickelten Bio-Schmierfettes zum Einsatz in Pelletpressen für die Futtermittelindustrie beschrieben. Dazu werden zuerst die Randbedingungen in realen Pelletpressen erfasst und diese Gegebenheiten auf einen abstrahierten Prüfstand übertragen.

4.1 Aufbau Pelletpressen in der Futtermittelindustrie

Pelletpressen werden wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben in zwei verschiedenen Bauformen hergestellt. Die Bauform der Scheibenmatrize ist dabei die gebräuchlichste Form für die Herstellung von Pelletpressen. Dabei werden die Kollerrollen mit Hilfe einer Hydraulischen Kraftaufprägung auf eine Scheibenmatrize gepresst. Pro Presse sind meist fünf Kollerrollen vorhanden, welche durch einen Elektromotor rotatorisch angetrieben werden und somit auf der Flachmatrize abrollen und das Futtermittel durch die Matrize in Form pressen. Pro Koller wird zur reibungsmindernden Übertragung der Rotationsbewegung ein Wälzlagerpaar eingesetzt. Dieses besteht aus zwei Kegelrollenlagern, welche in O-Anordnung zueinander gestellt sind.

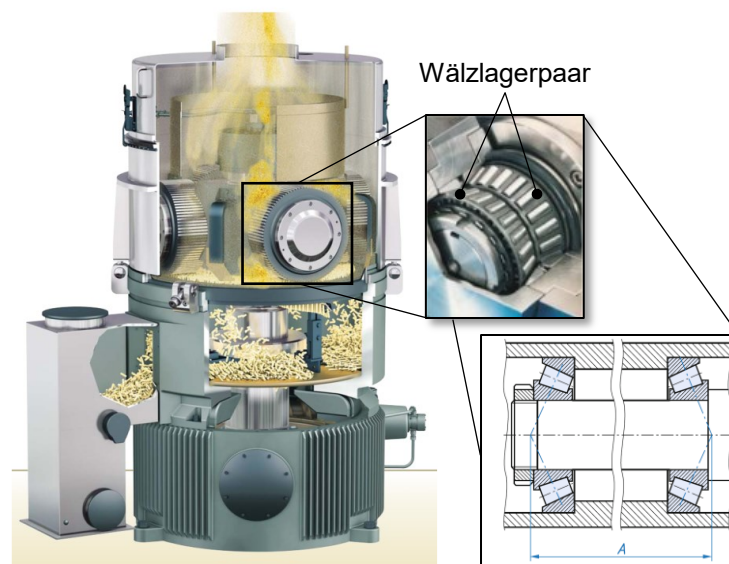


Bild 4-1: Pelletpresse mit Scheibenmatrize mit Wälzlagerpaar /Ama14/

4.1.1 Kraftleitung auf die Kollerlager einer Pelletpresse

Die dargestellten Annahmen und Berechnungsgrundlagen fokussieren sich auf Pelletpressen mit Scheibenmatrize. Bei dieser Bauweise wird extern eine definierte Druckkraft auf die Koller aufgeprägt, um das Material durch die Matrize zu drücken. Die bei dieser Bauform auftretenden Kräfte lassen sich einfacher definieren als bei der Bauform der Ringmatrize, da die Kraft auf die Lager hier stark vom Ausgangsmaterial abhängt. Um den Koller einer Pelletpresse mit Scheibenmatrize in seiner Position zu halten, überträgt eine Hydraulikmutter eine Kraft auf den Kollerkopf, welcher diese wiederum auf die Koller überträgt.

Nach Rücksprache mit dem Pressenhersteller Amandus Kahl wurde die Annahme der auftretenden Kräfte in der Pelletpresse angepasst. Die zuvor angenommene radiale Kraft auf die Koller von 334,4 kN gilt nur für sehr große industrielle Anlagen. Aus diesem Grund haben wurden die Betriebsparameter einer mittelgroße Pelletpresse, welche häufig in mittelgroßen Betrieben, wie auch bei größeren Futtermittelherstellern eingesetzt gewählt. Die Betriebskraft der Presse beträgt 545,4 kN auf die Hydraulikmutter, was einer Belastung von 109,08 kN pro Koller entspricht. Im Rahmen dieses Projektes sollen die mechanischen Randbedingungen dieser Presse emuliert werden.

In **Bild 4-2** ist der Querschnitt eines Kollers schematisch dargestellt. Die Hydraulikmutter einer mittelgroßen Anlage (1250 mm Matrizendurchmesser, 2 x 200 kW Antrieb und Kollerdurchmesser 450 mm) übt eine Kraft von circa 109,08 kN auf den Kollerkopf aus. Jeder Koller wird mit zwei Kegelrollenlagern in O-Anordnung gelagert. Somit wird auf jedes Wälzlager eine Radialkraft von 54,9 kN aufgeprägt (vgl. **Bild 4-2**). Des Weiteren besteht auf Grund der Inhomogenität und/oder einer ungleichen Verteilung des gepressten Materials die Möglichkeit, dass sich der Koller in axialer Richtung bewegt. Diese Bewegung wird konstruktionsbedingt blockiert, wodurch eine Axialkraft auf die Lager wirkt. Diese Kraft ist wesentlich geringer als die Radialkraft und wird mit einem Wert von 50 kN angenommen. Die Rotationsbewegung mit einer Drehzahl von 300 – 800 U/min wird durch einen Elektromotor erzeugt. In dem für dieses Projekt geplanten Prüfaufbau sollen diese mechanischen Randbedingungen emuliert werden.

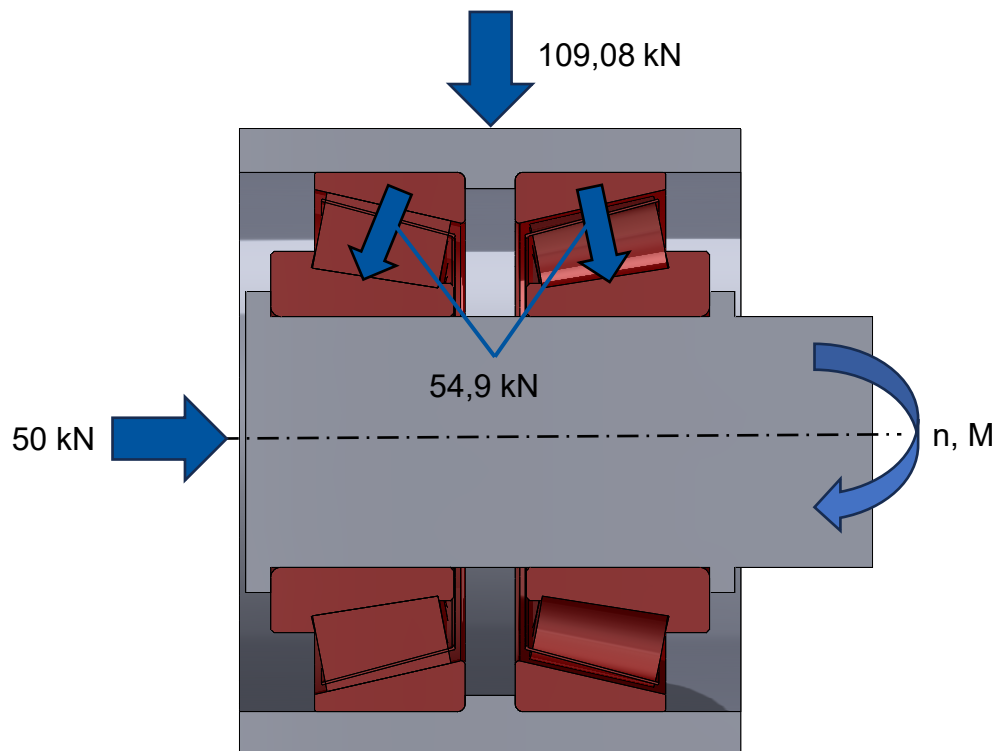


Bild 4-2: Vereinfachte Schnittansicht eines Kollers mit anliegenden Kräften

4.2 Entwicklung eines Prüfstandes zur anwendungsnahen Darstellung der Belastung von Kegelerlenlagern in Pelletpressen

Die Prüfung des Wälzlagerschmierstoffes soll unter realitätsnahen Bedingungen erfolgen. Dies wird dadurch gewährleistet, dass die Kegelerlenlager im Prüfstand unter vergleichbaren Randbedingungen betrieben werden wie in einer Pelletpresse. Der Prüfstands Aufbau lässt sich in die Kategorie IV der tribologischen Prüftechnik einordnen und wird somit als Bauteilversuch gewertet /Czi10/. Reale Prüfkörper werden dabei anwendungsnahen Prüfbeanspruchungen ausgesetzt. Dazu zählen sowohl die Belastung durch axiale und radiale Kräfte als auch die gleichzeitige rotatorische Bewegung.

4.2.1 Anforderungen an den Prüfstand

Der Prüfstand stellt die Belastungen eines einzelnen Kollers aus einer Futtermittelpresse mit Scheibenmatrize dar. Die Wälzlagerbelastung wird in Anlehnung an die Belastungen einer mittelgroßen Pelletpresse zur Futtermittelproduktion gewählt (vgl. Kapitel 4.1.1).

Die Schmierung der Lager erfolgt durch die Förderung von 12 g/h Schmierstoff, welcher gezielt auf die Wälzkörper geleitet wird. Der Prüfstand ist so aufgebaut, dass die eingeleiteten Kräfte realitätsgetreu wie in der Futtermittelpresse auf die Lager übertragen werden. Ein weiteres Kriterium ist die Betriebssicherheit der Anlage, welche unter anderem durch Dauerfestigkeit der Prüfstandkomponenten bei Aufprägung der auftretenden Belastungen gegeben ist.

4.2.2 Konstruktive Umsetzung

Die Konstruktion erfolgt unter Berücksichtigung der definierten mechanischen Randbedingungen sowie der im Projekt geforderten Prüfbedingungen. Bei der Entwicklung des Prüfstandes wurde methodisch gemäß der VDI-Richtlinien VDI 2221 und VDI 2222 Lösungen zur Umsetzung der Aufgaben definiert. Im Allgemeinen orientiert sich der Aufbau der Prü fzelle an der Norm DIN 51819-2 /DIN16b/, welche sich mit der Schmierstoffprüfung in Wälzlager n befasst. Im Folgenden wird zunächst der Aufbau der Prü fzelle dargestellt, um anschließend den Gesamtaufbau des Prüfstandes (vgl. **Bild 4-3**) zu erläutern.

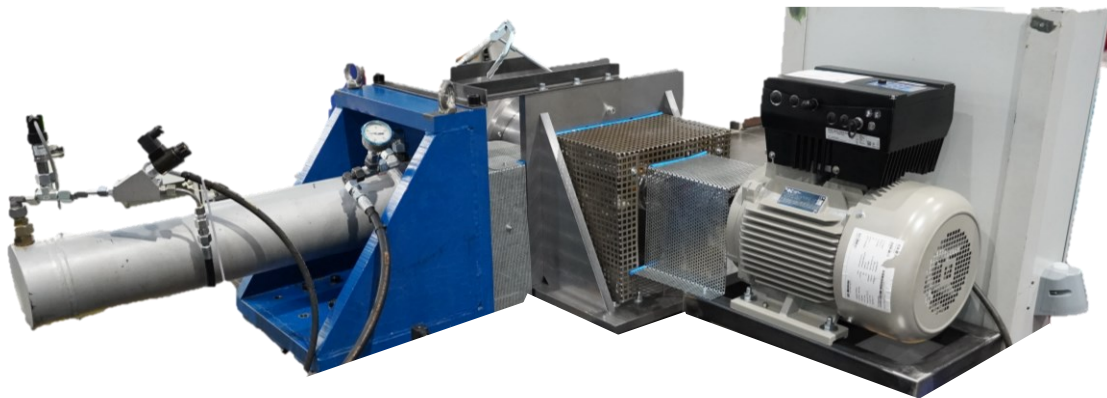


Bild 4-3: Gesamtansicht des Prüfstands

Prü fzelle

Im Folgenden wird detailliert die Entwicklung und der Aufbau der Prü fzelle des Lagerprü fstandes erläutert. Die exakte Positionierung sowie Nummerierung der einzelnen Bauteile sind in **Bild 4-4** dargestellt.

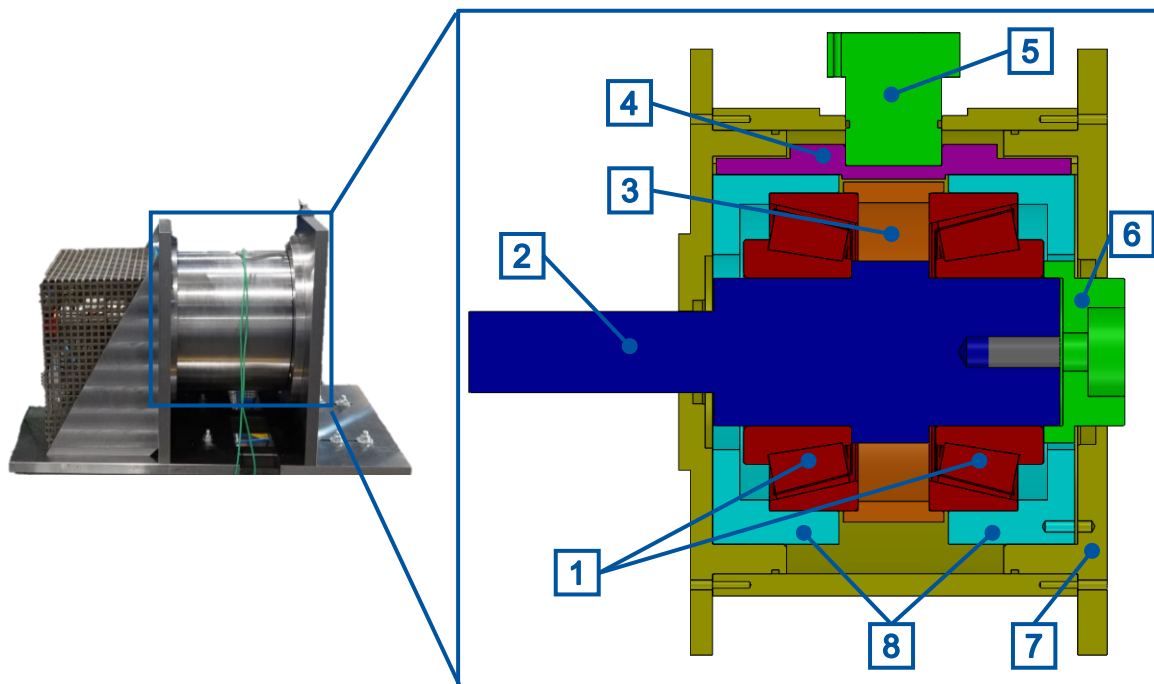


Bild 4-4: Prüfzelle in Schnittansicht

Die von außen durch den Hydraulikzylinder aufgebrachte Radialkraft wird über einen Stempel (5) in das Innere des modular aufgebauten Gehäuses (7) geleitet. Die Kraft wird von dem Stempel auf eine Platte (4) übertragen, welche die Belastung anschließend gleichmäßig auf die beiden geteilten Lagerschalen (8) weiterleitet. Dadurch werden beide Kegelrollenlager (1) radial belastet, welche auf die Welle (2) in O-Anordnung gepresst werden (vgl. **Bild 4-5**). Bei den Lagern handelt es sich um zwei Kegelrollenlager der Größe 32320, wie sie in einer mittelgroßen Pelletpresse zum Einsatz kommen (vgl. **Bild 4-5**).

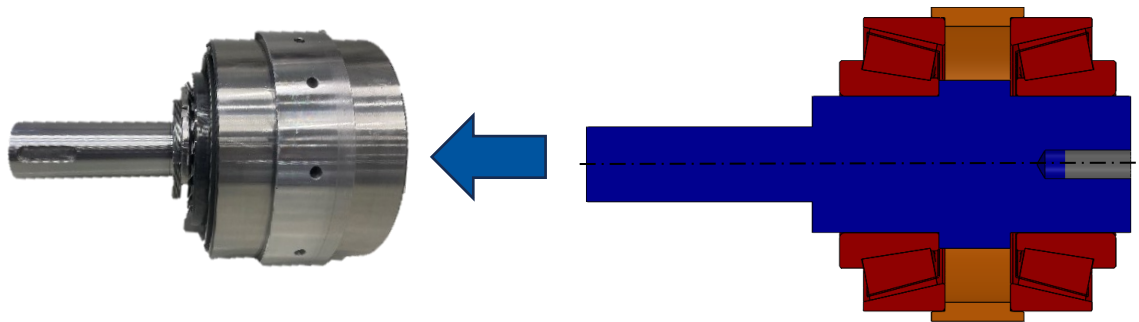


Bild 4-5: Lager auf Welle

Die Axialkraft wird mit Hilfe einer Hülse (6), welche mit einer Schraube unter Berücksichtigung des entsprechenden Drehmoments angezogen wird, auf die Kegelrollenlager übertragen. Die Kraftleitung vom ersten auf das zweite Lager geschieht über eine Distanzhülse (3). Die von außen aufgebrachte Rotation und das Drehmoment werden über die Welle auf die Lager übertragen.

Im Rahmen des Konstruktionsprozesses der Prüfzelle wurde eine FEM-Analyse (Finite-Elemente-Methode) mit dem Programm Ansys Mechanical 2023 R2 durchgeführt, um die Betriebssicherheit des Prüfstandes zu gewährleisten. Bei der Analyse wird das HEX-Dominante-Verfahren verwendet. Die Gittergröße beträgt dabei 3,5 mm. Die durchgeführte Festigkeitsanalyse hat ergeben, dass an der Unterseite der Platte (4), welche die aufgeprägte Axialkraft auf die Wälzlager weiterleitet, Spannungsspitzen auftreten. Dies kann bei einer ungeeigneten Werkstoffauswahl zu einem Bauteilversagen führen (vgl. **Bild 4-6**). Des Weiteren führt die Krafteinleitung zu einer plastischen Verformung der Platte. Um potenzielle Probleme im Betrieb zu vermeiden, wird für dieses Bauteil ein legierter Vergütungsstahl (42CrMo4/Streckgrenze 550 MPa/Zugfestigkeit 490-630 MPa) verwendet. Die weiteren Komponenten werden aus Baustahl (S355/Streckgrenze 550 MPa/Zugfestigkeit 720 MPa) gefertigt.

Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 1 s

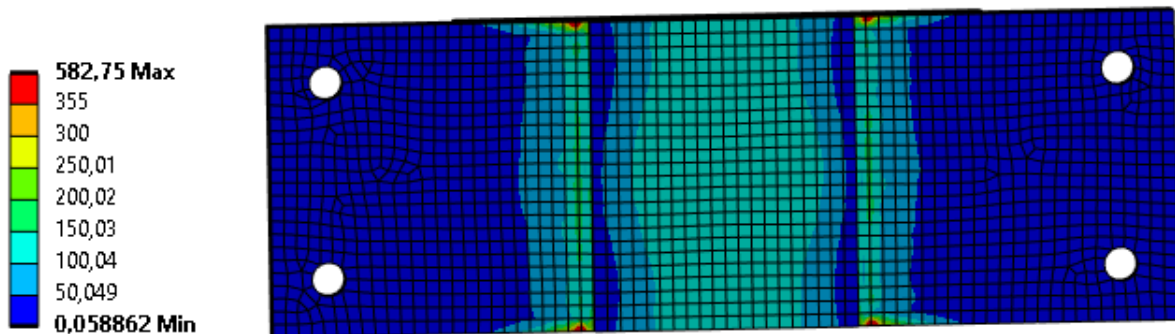


Bild 4-6: FEM-Analyse der Plattenunterseite

Gesamter Prüfaufbau

Bild 4-7 zeigt den vollständigen Prüfaufbau, welcher die Querkraft- und Rotationseinleitung sowie einige Messeinrichtungen und Halterungen beinhaltet.

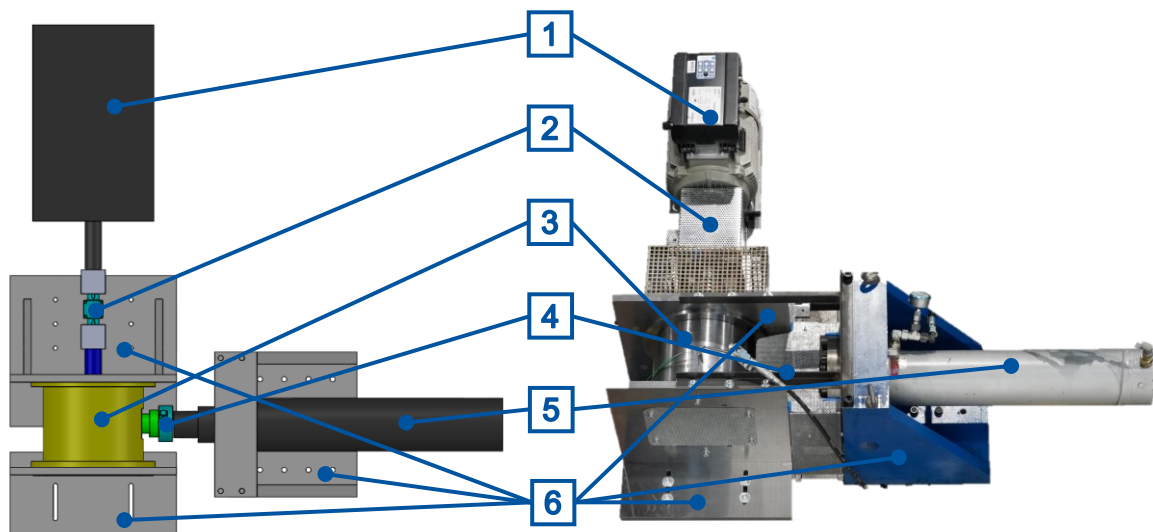


Bild 4-7: Gesamter Prüfstand

Die Prüfkammer (3) sowie ein Hydraulikzylinder (5) werden mittels Halterungen (6) zueinander auf einem Gestell positioniert. Der Prüfaufbau wird auf einem portablen Maschinenbett befestigt, wodurch Versuche mit definierter Umgebungstemperatur im Bereich von -70 bis $+70$ °C in der Klimakammer des ifas durchgeführt werden können. In weiterführenden experimentellen Untersuchungen des Schmierstoffes ist eine entsprechende

Analyse bei tiefen Temperaturen vorgesehen. Im Rahmen des vorliegenden Projektes erfolgt die Durchführung der Versuche unter Laborbedingungen, um eine Evaluierung des Einflusses der unterschiedlichen Schmierfette unter konstanten Bedingungen zu ermöglichen.

Die Radialkraft wird durch den Hydraulikzylinder (5) auf die Prü fzelle ausgeübt. Die externe Versorgung mit hydraulischer Leistung erfolgt über ein Hydraulikaggregat. Die Überwachung der Radialkraft erfolgt durch einen zwischen Zylinder und Prüfstand verbauten Druckkraftsensor (4), welcher über einen Messbereich von 0 bis 500 kN bei einer Linearitätsabweichung von $\pm 0,25$ % verfügt.

Die Rotation der Welle wird durch einen Elektromotor (1) erzeugt, dessen Drehzahl über einen Frequenzumrichter variabel anpassbar ist. Zwischen Motor und Prü fzelle ist eine Drehmomentmesswelle (2) angeordnet. Diese dient zur Überwachung des an der Welle entgegenwirkenden Drehmoments, das durch die Reibung der Prü flager erzeugt wird. Die Messwelle hat einen Messbereich von 0 bis 200 Nm. Mit Hilfe der Ausprägung des Drehmoments kann auf die Reibungsminderung des eingesetzten Schmierfettes geschlossen werden. Dadurch ist es möglich die Effizienz unterschiedlicher Schmierfette zu vergleichen. Zur Temperaturüberwachung des Schmierstoffes werden Thermoelemente in der Prü fzelle verbaut, welche möglichst nah an die Lager platziert werden. Anhand der Temperaturentwicklung während des Betriebs kann sowohl eine Aussage über die auftretenden Reibungsverluste als auch über den möglichen Verschleiß der Lager getroffen werden.

Die Versorgung des Prüfstandes mit Schmierfett erfolgt über eine externe, automatisierte Fettpresse. Diese fördert den Schmierstoff kontinuierlich in die Prü fzelle. Bei der Auswahl der Fettpresse wurde darauf geachtet, dass sie den in Futtermittelbetrieben eingesetzten Modellen entspricht. Es handelt sich dabei um eine pneumatisch betätigte Einkolbenpumpe. Die Fettpumpe fördert das Fett in einem Druckverhältnis von 1:60 an die Lager. Der Betriebsdruck des Schmiergerätes liegt zwischen 3,5 und 8,5 bar, wobei die Fettfördermenge über diesen reguliert wird. Der Druck wird nicht am Gerät eingestellt, sondern über einen separaten vorgeschalteten Druckminderer reguliert.

Radiale Krafteinleitung auf die Lager

Die Art und Weise der Krafteinleitung auf die Lager in der Prüfzelle unterscheidet sich von der Krafteinleitung, wie sie in einer echten Pelletpresse stattfindet. Um eine realitätsnahe Kraftverteilung in den Wälzlager in der Prüfzelle darstellen zu können, werden sowohl von einem realen Koller als auch von der Prüfzelle FEM-Analysen durchgeführt. Verglichen werden die Spannungen in einem einzelnen Wälzlager bei gleicher Krafteinwirkung. Die Analyse zeigt, dass mit zunehmender Kraft die Spannungszunahme im realen Koller größer ist als im Prüfstand. Dies ist durch die konstruktive Gegebenheit des Prüfstandes gegeben und wurde bei der Entwicklung berücksichtigt. Bei einer realen Kraftaufprägung müsste die Antriebswelle zusätzlich durch zwei weitere Lager gestützt werden. Wodurch jedoch weitere Reibverluste entstehen, welche nicht eindeutig quantifiziert werden können. Dies führte dazu, dass das vorgestellte Prüfkonzept gewählt wurde. Zur Überprüfung der Spannungsverhältnisse bei einer definierten Kraft im Koller muss eine höhere Kraft im Prüfstand eingeleitet werden. So ergibt sich eine Prüfkraft von 137,68 kN für eine Pelletpresse mit einer Betriebskraft von 109,08 kN (vgl. **Bild 4-8**). Der Bereich unterhalb von 30 kN liegt außerhalb des Messbereichs des Sensors, wodurch die Werte nicht berücksichtigt werden.

Kraft [kN]	Spannung im Koller [MPa]	Spannung im Prüfstand [MPa]
30	26,8	43,7
60	53,7	57,8
190	170,7	125
220	197,7	141,2
360	323,7	215

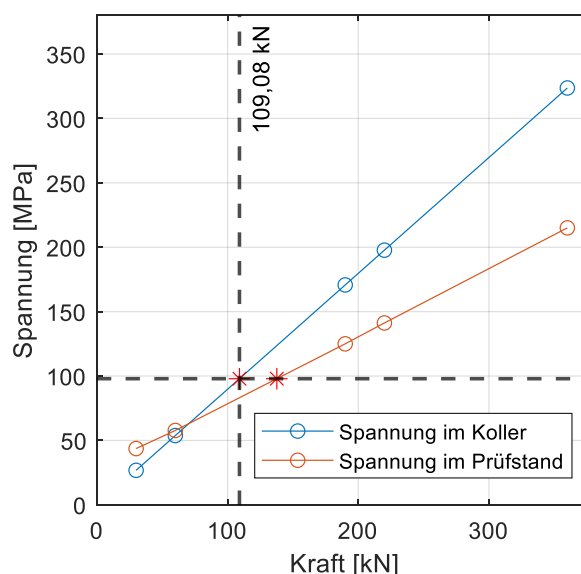


Bild 4-8: Spannungen im Lager

Kräfte am gesamten Prüfstand

Infolge der Kräfte, die vom Hydraulikzylinder auf die Prüfzelle übertragen werden, ist eine Prüfung des gesamten Prüfstands auf Defekte erforderlich. Auch hier findet eine FEM-Analyse statt. Diese zeigt, dass eine zusätzliche Verbindung der Halter der Prüfzelle mit dem Halter des Hydraulikzylinders erforderlich ist, um ein Verbiegen des Gestells zu verhindern (vgl. **Bild 4-9**).

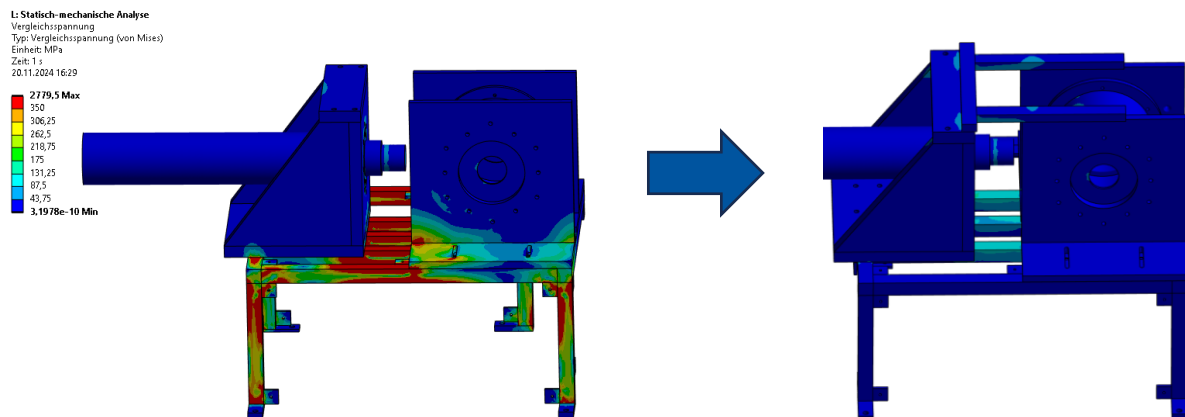


Bild 4-9: FEM-Analyse vom gesamten Prüfstand

5 Erprobung der Leistungsfähigkeit des Schmierfettes

5.1 Versuchsdurchführung

Ziel der Versuche ist es, das Drehmoment und die Temperaturentwicklung im Prüfstand bei unterschiedlichen Belastungen zwischen den betrachteten Fetten zu untersuchen und die Eignung des neuentwickelten Bio-Schmierfettes zum Einsatz in Futtermittelpressen festzustellen. Dazu werden zunächst Referenzwerte für das Wälzlagerfett auf Mineralölbasis und Lithiumverdicker benötigt.

Beim Aufbau des Prüfstandes werden die Kegelrollenlager mit dem jeweiligen Fett vorgefüllt. Nach Aufnahme der Referenzwerte mit dem Lithium-Schmierfett werden die Prüflager ausgebaut und durch neue, mit dem Bio-Fett vorgefüllte Wälzlager ersetzt. Die Versuche werden mit gleichen Versuchsparametern wiederholt, um anschließend die beiden Schmierfette vergleichen zu können. Im folgenden Kapitel werden die Inbetriebnahme des Prüfstandes und die Versuchsdurchführung sowie die erzielten Messergebnisse erläutert und analysiert.

5.1.1 Inbetriebnahme des Prüfstandes

Die Inbetriebnahme des Prüfstandes erfolgt nach der Fertigung der einzelnen Bauteile anhand von Fertigungszeichnungen und der Montage. Die Gestelle, welche den Prüfstand mit dem Maschinenbett verbinden werden ausgerichtet und mit Hilfe von Schweißen gefügt. Vor dem Zusammenbau der einzelnen Komponenten erfolgt eine Kalibrierung der eingesetzten Sensoren in deren jeweiligem Messbereich. Im Anschluss wird der Prüfstand montiert.

Die Steuerung wird so ausgearbeitet, dass eine konstante radiale Kraft durch den Zylinder bereitgestellt wird. Es wird dabei ein Lasthalteventil verwendet, um den Druck in der Zylinderkammer über einen langen Zeitraum konstant zu halten, ohne den Dauerbetrieb des antreibenden Aggregates. Fällt der Druck in der Zylinderkammer ab, wird entsprechend das Aggregat aktuiert und passt den Druck wieder an, bis die eingestellte Kraft erreicht wird. Bei der Inbetriebnahme konnte die Funktion der Verschaltung sichergestellt werden.

5.1.2 Versuche mit herkömmlichem Lithium-Schmierfett

Insgesamt werden zwei Versuchsreihen mit dem Fett auf Mineralölbasis durchgeführt. Die Versuche dienen zum einen der Erfassung der Referenzwerte und zum anderen einem generellen Funktionstest des Prüfstandes. Bei einer Versuchsdauer von fünf Stunden wird zunächst eine radiale Prüfkraft von 20 kN in die Prü fzelle eingeleitet. Nach der erfolgreichen Durchführung des ersten Versuchs wird nun die radiale Prüfkraft auf 110 kN erhöht, wobei sich die Versuchsdauer ebenfalls auf fünf Stunden beläuft. Die aufgezeichneten Messwerte umfassen das Drehmoment, welches der Motor aufbringen muss, die Lagertemperaturen und die Radialkraft, welche zwischen Hydraulikzylinder und Prü fzelle aufgebracht wird. Des Weiteren wird dokumentiert, wann den Lagern Schmierfett zugeführt wurde.

5.1.3 Versuche mit Bio-Schmierfett

Nach erfolgreicher Durchführung der Versuche mit dem Lithium-Schmierfett wird der Prüfstand demontiert, sodass die verwendeten Wälzlager durch neue Wälzlager ausgetauscht werden. Diese werden mit dem Bio-Schmierfett vorgefüllt. Im Anschluss wird auch das Fett in der Fettpresse ausgetauscht. Nach dem Austausch der Wälzlager werden die zuvor durchgeführten Versuche wiederholt. Im Rahmen der Versuchsreihe wird der Versuch mit einer Belastung von 20 kN durchgeführt. Gleiches gilt für den Versuch bei 110 kN. Die Laufzeit der Versuche mit dem neuartigen Bio-Schmierfett wird entsprechend ausgeweitet, um eine Aussage über das reale Verhalten des Schmierfettes zu erzielen.

5.1.4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der experimentellen Versuche im Wälzlagerprüfstand vorgestellt. Dazu werden die zur Auswertung relevanten Daten für beide betrachteten Schmierfette dargestellt. Zu diesen Daten gehören das Drehmoment, die Temperatur am Wälzlager

Versuche bei 20 kN (geringe Laststufe)

In **Bild 5-1** ist der Verlauf des Drehmoments des Prüfstandes bei der Verwendung der beiden untersuchten Schmierfette über die Laufzeit von 300 Minuten aufgetragen. Dabei wurde das Drehmoment ab einem Kaltstart des Prüfstandes aufgetragen. Zuvor wurden

die Lager wie beschrieben mit dem entsprechenden Schmierfett gefüllt. Eine Nachfüllung während des Betriebs hat nicht stattgefunden. Die beiden Kurven zeigen einen unterschiedlichen Verlauf der beiden untersuchten Schmierfette auf. Das Lithium-Schmierfett weist über die gesamte Prüfzeit einen gleichmäßigen Verlauf des Drehmomentes auf. Dabei sinkt das Drehmoment kontinuierlich über die gesamte Prüfzeit. Das neuentwickelte Bio-Schmierfett weist dagegen einen deutlich unruhigeren Verlauf auf. Besonders zu Beginn der Prüfung sind azyklische Schwankungen im Drehmoment zu erkennen. Dabei steigt das Drehmoment teilweise auf einen Wert von bis zu 40 Nm, wohingegen der Maximalwert bei der Verwendung des Lithium-Schmierfettes bei 17 Nm liegt. Während der überwiegenden Prüfzeit liegt das Drehmoment bei der Verwendung des Bio-Schmierfettes circa um den Faktor zwei höher als der des Lithium-Schmierfettes. Ab Minute 180 ist ein starker Abfall des Drehmomentes bei der Verwendung des Bio-Schmierfettes auszumachen dabei sinkt das Drehmoment zum Teil unterhalb dem des Lithiumfettes.

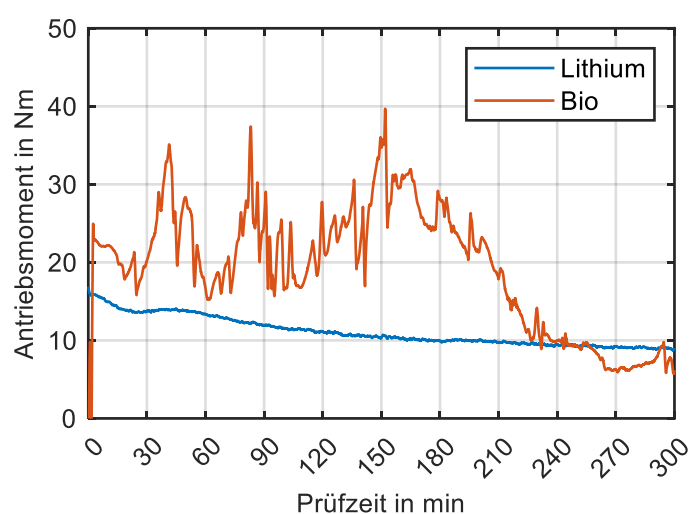


Bild 5-1: Verlauf des Drehmoments beim Betrieb mit 20 kN Radialkraft für das Lithium-Schmierfett und Bio-Schmierfett

In **Bild 5-2** sind die Wälzlagertemperaturen der beiden Kegelrollenlager über die Prüfzeit aufgetragen. Lager 1 ist dabei das zum Antrieb örtlich näher gelegene Lager. Im Verlauf der Temperaturen, die an den Wälzlagern mit Betrieb beider Fette auftreten lässt, sich der abweichende Drehmomentverlauf ableiten. Das Bio-Schmierfett weist über die gesamte Prüfzeit höhere Lagertemperaturen auf als das Lithium-Schmierfett. Die Temperaturen bei der Verwendung des Bio-Schmierfettes steigt bis zu 76 °C an bevor sie ähnlich wie das Drehmoment abfallen.

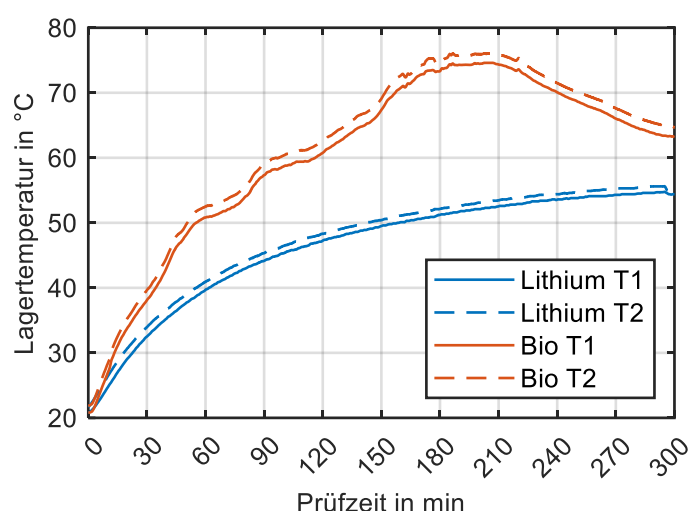


Bild 5-2: Verlauf der Temperatur an den Wälzlager (T1 und T2) beim Betrieb mit 20 kN Radialkraft für das Lithium-Schmierfett und Bio-Schmierfett

Versuche bei 110 kN (hohe Laststufe)

Die nachfolgenden Versuche wurden bei einer höheren Laststufe von 110 kN Radialkraft durchgeführt. Diese Kraft ist vergleichbar mit den wirkenden Lasten einer realen Pelletpresse (vgl. Kapitel 4.2).

In **Bild 5-3** sind die Ergebnisse der Aufzeichnung des Drehmomentes über die Prüfzeit von 300 min bei einer Belastung von 110 kN. In der oberen Abbildung ist der Verlauf des Drehmomentes über die Prüfzeit bei der Verwendung des Lithium-Schmierfettes. Im unteren Diagramm sind zwei zeitlich unabhängige Verläufe bei der Verwendung des Bio-Schmierfettes aufgetragen, um die Reproduzierbarkeit darzustellen. Bei dem Lithium-Schmierfett ist abgesehen von der deutlichen Drehmomentzunahme nach 120 min keine Schwankung im Drehmoment festzustellen. Nach der Drehmomentzunahme wurde Schmierfett nachgefördert wodurch nach einigen Minuten das Ausgangsdrehmoment wieder erreicht wird.

Bei Verwendung des Bio-Schmierfettes ist bei der höheren Laststufe ebenfalls ein höheres Drehmoment als bei der Verwendung des Lithium-Schmierfettes zu erkennen. V1 und V2 stellen dabei zwei unabhängig voneinander durchgeführte Messungen dar. Der Mittelwert des Drehmomentes liegt bei dem Lithium-Schmierfett bei 15,7 Nm und dem Bio-Schmierfett bei 25,9 Nm. Des Weiteren unterliegt der Drehmomentverlauf großen Schwankungen und erreicht ein Maximum von 48 Nm. Nach 120 Minuten ist ein leichter

Abfall des Drehmoments zu erkennen, welcher jedoch nicht so stark ist wie bei der niedrigen Temperaturstufe. Weiterhin steigt das Drehmoment nach diesem Abfall wieder leicht an. Eine Schmierstoffzufuhr fand jeweils bei einer Prüfdauer von 150 min statt.

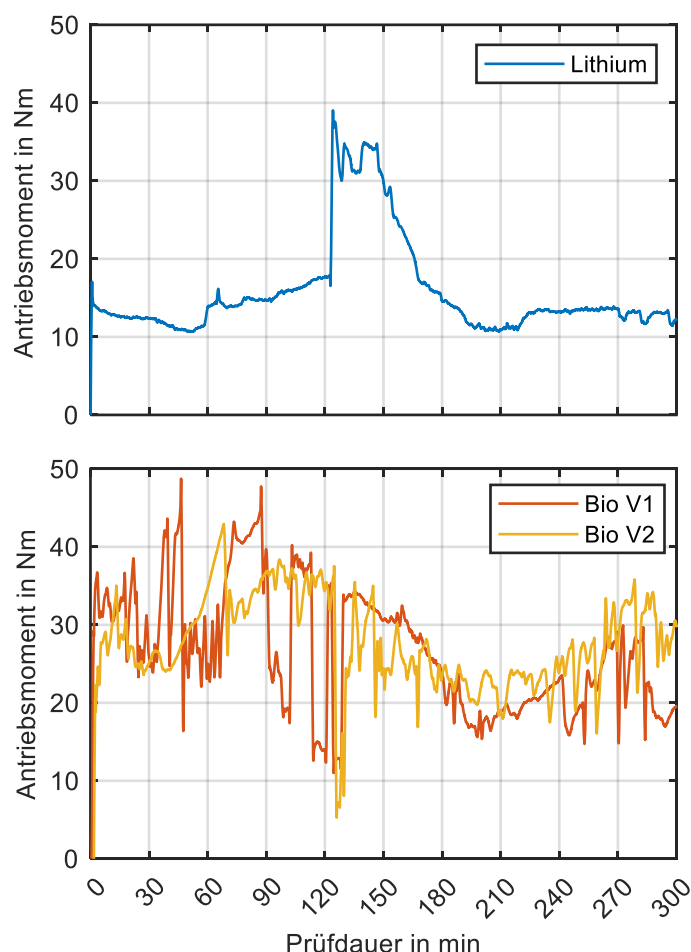


Bild 5-3: Verlauf des Drehmoments beim Betrieb mit 110 kN Radialkraft für das Lithium-Schmierfett (oben) und Bio-Schmierfett (unten)

Bild 5-4 stellt den Lagertemperaturverlauf während der Versuche für die beiden untersuchten Schmierfette dar. Aufgrund der Ergebnisse bei 20 kN wird zur Übersichtlichkeit nur Wälzlager 1 in die Betrachtung einbezogen. Bei Betrachtung der Lagertemperaturen ist auch bei der höheren Laststufe eine Korrelation der Lagertemperatur mit dem Drehmoment gegeben. Die Temperatur des Wälzlagers ist bei Verwendung der Bio-Schmierfettes über die gesamte Prüfzeit höher als bei Verwendung des Lithium-Schmierfettes.

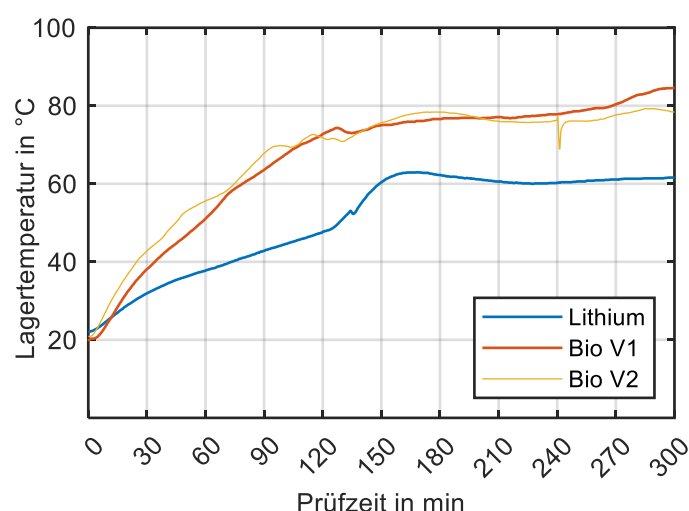


Bild 5-4: Temperaturverlauf beim Betrieb mit 110 kN Radialkraft für das Lithium-Schmierfett und Bio-Schmierfett

5.1.5 Abschließende Bewertung der Messergebnisse und weiteres Vorgehen

Es kann davon ausgegangen werden, dass die abweichende chemische Struktur des Bioschmierfettes zu einem unterschiedlichen Reibungsminderungsverhalten führt als beim konventionell eingesetzten Lithiumschmierfett. Die Ursache der gemessenen Schwankungen im Drehmoment und der allgemein höhere Drehmomentverlauf müssen in separierten tribologischen Untersuchungen identifiziert werden. Ein Grund dafür kann das höhere Haftverhalten (Oberflächenaffinität) des Bio-Schmierfettes sein. Eine weitere Ursache ist durch die deutlich höhere Grundölviskosität zu vermuten, wodurch das Öl wesentlich träger ist und die Abgabe (Ausbluten) des Öls aus dem Verdicker erschwert wird. Was sich in den Ergebnissen zur Ölabscheidung widerspiegelt (Kapitel 3.3.7). Dadurch kann es sein, dass das Schmierfett ohne wesentlich Ölabbgabe aus dem Schmierpalt befördert wird.

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass im Projekt ein biobasiertes Schmierfett entwickelt wurde, welches zum größten Teil den gestellten Anforderungen in Pelletpressen entspricht. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass es im Bereich der Leistungsfähigkeit mit den konventionell eingesetzten mineralölbasierten Fetten noch nicht vergleichbar ist. Daraus ergibt sich weiterer Forschungsbedarf die tribologischen Eigenschaften des Bio-Schmierfettes zu optimieren. Zurzeit werden Optimierungsansätze durch die Kajo GmbH in Hinblick auf die Schwankungen des Drehmomentes und der Förderbarkeit des Schmierfettes entwickelt. Ein erster Ansatz, an welchem zurzeit gearbeitet wird ist, die

Grundölviskosität zu verringern sowie zusätzliches Grundöl dem Schmierfett nach der Verseifung zuzuführen. Dieses ist somit weniger stark im Verdicker gebunden und kann das Verdickergerüst leichter verlassen und die Schmierung der tribologischen Kontakte gewährleisten.

Die Erprobung des überarbeiteten Schmierfettes soll im Anschluss in dem für das Projekt entwickelten Lagerprüfstand validiert werden. Erst wenn die Daten die Freigabe für einen sicheren, kontinuierlichen Betrieb im Prüfstand gewährleisten, kann dieser in der realen Pelletpresse für Futtermittel bei den MEGA Tierernährung GmbH & Co. KG eingesetzt werden. Die Arbeiten dieses Projektes werden entsprechend zwischen der Kajo GmbH und dem ifas unmittelbar weitergeführt, um dies zu erreichen.

6 Öffentlichkeitsarbeit

Die erzielten Ergebnisse des Projektes wurden auf Fachtagungen, Messen und weiteren wissenschaftlichen Veranstaltungen in Gesprächen mit Experten und Anwendern vorgestellt. Zu nennen sind dabei die Tribologie-Fachtagung der Gesellschaft für Tribologie e.V., die Schmierstoffmesse Lubricant Expo 2024, die Schmierstoff-Fachtagung Nextlub 2025 und das Mitgliedertreffen des Sustainable Lubricants Committees.

Darüber hinaus wurden die Projektergebnisse in den Lehrveranstaltungen des ifas vorgestellt. So werden neben dem Fachpublikum auch Studierende für das Thema sensibilisiert. Die Darstellung des Projekts stieß bislang auf großes Interesse, die Thematik wird in nachfolgenden Projekten und Anträgen am Institut und der Firma KAJO weiterverfolgt.

Aachen, im Januar 2025

Katharina Schmitz, Univ.-Prof. Dr.-Ing.
- Institutsleiterin -

Sebastian Deuster, M.Eng.
- Sachbearbeiter -

I Abbildungsverzeichnis

Bild 2-1: Kollergangpresse mit Scheibenmatrize (links) / Kollergangpresse mit Ringmatrize (rechts) /Dör11/	9
Bild 2-2: Schematische Darstellung einer Pelletpresse mit Scheibenmatrize /Pet12/..	11
Bild 2-3: Zusammensetzung Schmierfett /Man17/	12
Bild 3-1: Klassisches Temperaturprofil bei der Schmierstoff Herstellung a) Verseifung; b) Entwässerung; c) Abkühlung; d)Wiedererhitzung; e) Abkühlung und Rühren /Kla82/	16
Bild 3-2: Teilschritt 1 Herstellung Schmierfett: Herstellung überbasisches Calciumsulfonat unter konstanter Temperatur.	17
Bild 3-3: Teilschritt 2 Herstellung Schmierfett. Umwandlung Grundöl in Calciumsulfonatschmierfett	18
Bild 3-4: Umwandlung des CaCO_3 von der Vaterit- in die Calcit-Form	18
Bild 3-5: Verdickerstruktur von Lithium und Calcium im Vergleich /Som15/	19
Bild 4-1: Pelletpresse mit Scheibenmatrize mit Wälzlagerpaar /Ama14/	26
Bild 4-2: Vereinfachte Schnittansicht eines Kollers mit anliegenden Kräften	28
Bild 4-3: Gesamtansicht des Prüfstands.....	29
Bild 4-4: Prüfwelle in Schnittansicht	30
Bild 4-5: Lager auf Welle	31
Bild 4-6: FEM-Analyse der Plattenunterseite	32
Bild 4-7: Gesamter Prüfstand	32
Bild 4-8:Spannungen im Lager	34
Bild 4-9: FEM-Analyse vom gesamten Prüfstand	35
Bild 5-1: Verlauf des Drehmoments beim Betrieb mit 20 kN Radialkraft für das Lithium-Schmierfett und Bio-Schmierfett.....	38
Bild 5-2: Verlauf der Temperatur an den Wälzlagern (T1 und T2) beim Betrieb mit 20 kN Radialkraft für das Lithium-Schmierfett und Bio-Schmierfett	39
Bild 5-3: Verlauf des Drehmoments beim Betrieb mit 110 kN Radialkraft für das Lithium-Schmierfett (oben) und Bio-Schmierfett (unten)	40
Bild 5-4: Temperaturverlauf beim Betrieb mit 110 kN Radialkraft für das Lithium-Schmierfett und Bio-Schmierfett.....	41

II Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Ruhepenetration und Walkpenetration nach ASTM D 217	21
Tabelle 3-2: Tropfpunkt nach ASTM 2265	21
Tabelle 3-3: Kinematische Viskosität nach ASTM D 7042	22
Tabelle 3-4: Korrosionsgrad nach DIN 51802	22
Tabelle 3-5: Water-Washout Test nach ASTM D 1264	23
Tabelle 3-6: Messergebnisse nach DIN 51350-4	24
Tabelle 3-7: Messergebnisse nach DIN 51817	25

III Literaturverzeichnis

- /Ama14/ Amandus Kahl GmbH & Co. KG: KAHL Pelletpressen. für Futtermittel, Trockengrün, Trockenschnitzel, Stroh und weitere nachwachsende Rohstoffe, Hamburg, 2014.
- /AST18/ ASTM 1264:2018, Test Method for Determining the Water Washout Characteristics of Lubricating Greases.
- /AST21a/ ASTM D 217:2021, Test Methods for Cone Penetration of Lubricating Grease.
- /AST21b/ ASTM D 7042:2021, Test Method for Dynamic Viscosity and Density of Liquids by Stabinger Viscometer (and the Calculation of Kinematic Viscosity).
- /AST22/ ASTM 2265:2022, Test Method for Dropping Point of Lubricating Grease Over Wide Temperature Range.
- /Bau23/ Baumgarten, R.: Lithiumabbau in Argentinien: Die Schattenseiten der Verkehrswende. tagesschau.de, 2023.
- /Bög17/ Bögli, S.; Bickel, R.; Bernhard, S.: PAK POSH MOSH MOAH. Mineralölrückstände in Lebensmitteln - mögliche Ursachen, 2017.
- /Bos18/ Bosman, R.; Lugt, P. M.: The Microstructure of Calcium Sulfonate Complex Lubricating Grease and Its Change in the Presence of Water. Tribology Transactions 5/61, S. 842–849, 2018.
- /Bun18/ Bundesinstitut für Risikobewertung: Hochraffinierte Mineralöle in Kosmetika: Gesundheitliche Risiken sind nach derzeitigem Kenntnisstand nicht zu erwarten: Aktualisierte Stellungnahme Nr. 008/2018 des BfR vom 19. Februar 2018. Bundesbehörden und Einrichtungen im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), 2018.
- /Bun22/ Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft: Zweiundzwanzigste Verordnung zur Änderung der Bedarfsgegenständeverordnung, 2022.
- /CEN06/ EN ISO 21469:2006, Sicherheit von Maschinen - Schmierstoffe mit nicht vorhersehbarem Produktkontakt.
- /Czi10/ Czichos, H.: Tribologie-Handbuch. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2010.

- /Deu20/ Deutscher Bauernverband e.V.: Situationsbericht 2019/20. 1.1 Wirtschaftliche Bedeutung des Agrarsektors. <https://www.bauernverband.de/situationsbericht-19/1-landwirtschaft-und-gesamtwirtschaft/11-wirtschaftliche-bedeutung-des-agrarsektors>, Stand: 24.09.2021.
- /Deu22/ Deuster, S.; Holzer, A.; Schmitz, K.: Influence of the Pressure-Viscosity Behavior of Different Base Oils on the Formation of Lubricating Films in Tribological Contacts. In (Senatore, A.; Frosina, E. Hrsg.): 2022 Global Fluid Power Society Ph.D. Symposium. River Publishers, Denmark, S. 1–15, 2022 - 10/14/2022.
- /DIN14/ 51817:2014, Bestimmung der Ölabscheidung aus Schmierfetten unter statischen Bedingungen.
- /DIN15/ 51350:2015, Prüfung im Vierkugel-Apparat.
- /DIN16a/ 51805-2:2016, Bestimmung des Fließdruckes von Schmierfetten mit dem Verfahren nach Kesternich.
- /DIN16b/ DIN 51819-2:2016, Prüfung von Schmierstoffen - Mechanisch-dynamische Prüfung auf dem Wälzlagerschmierstoff-Prüfgerät FE8.
- /DIN16c/ DIN EN 16807:12.2016, Flüssige Mineralöl-Erzeugnisse – Bio-Schmierstoffe – Kriterien und Anforderungen für Bio-Schmierstoffe und biobasierte Schmierstoffe (EN 16807).
- /DIN17/ 51802:2017, Prüfung von Schmierfetten auf korrosionsverhindernde Eigenschaften.
- /Dör11/ Döring, S.: Pellets als Energieträger. Technologie und Anwendung. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.
- /EU 19/ EU Ecolabel: Lubricant Substance Classification list (LuSC-list). Version date: 06022019. <https://ec.europa.eu/environment/ecolabel/documents/LuSC%20list%20for%20new%20criteria%20February%202019.pdf>, Stand: 21.04.2021.
- /Eur20/ European Commision: Farm to Fork Strategy. For a fair, healthy and environmentally-friendly food system. EU Green Deal. https://ec.europa.eu/food/system/files/2020-05/f2f_action-plan_2020_strategy-info_en.pdf, Stand: 24.09.2021.

- /Eur24/ Eurofins NDSC Food Testing Germany GmbH: EU-Stellungnahme zum Umgang mit MOAH-Befunden. <https://www.eurofins.de/lebensmittel/food-news/food-testing-news/moah-befunde-in-lebensmitteln/>, Stand: 30.12.2024.
- /Gro01/ Grob, K. et al.: Contamination of animal feed and food from animal origin with mineral oil hydrocarbons. Food Additives & Contaminants 1/18, S. 1–10, 2001.
- /Kar22/ Karl, L.-M.; Tölle, K.; Wenzel, L.: Olivenöl im Test: Nahezu alle mit Mineralöl verunreinigt. Ökotest, 2022.
- /Kla82/ Klamann, D.: Schmierstoffe und verwandte Produkte. Herstellung, Eigenschaften, Anwendung. Unter Mitarb. von. Verl. Chemie, Weinheim usw. Basel, 1982.
- /Kre21/ Krenn, K.: Öko-Test: Veggie-Würste sind mit Mineralölen belastet. agrar-heute.com, 2021.
- /Man17/ Mang, T.; Dresel, W. Hrsg.: Lubricants and lubrication. Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2017.
- /Nie20/ Niedersächsisches Landesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit: Mineralölverunreinigung in Lebensmitteln. https://www.laves.niedersachsen.de/startseite/lebensmittel/ruckstande_verunreinigungen/mineraloel-in-verpackten-lebensmitteln-161848.html, Stand: 26.11.2024.
- /Pet12/ Peters, J.: Entwicklung einer konzeptionellen Lösung zur Presskraftherzeugung bei Pelletpressen. Bachelorthesis, Hamburg, 2012.
- /Rat22/ Rathje, M.: Reich an Ballaststoffen und Toxinen: „Öko-Test“ findet Schimmelpilze, Glyphosat und Mineralöl in Haferflocken. Der Tagesspiegel, 2022.
- /Sch23/ Schrenk, D. et al.: Update of the risk assessment of mineral oil hydrocarbons in food. EFSA journal. European Food Safety Authority 9/21, e08215, 2023.
- /Som15/ Sommer, M.: Einfluss des Schmierfetts auf das tribologische System Radial-Wellendichtung: Betriebsverhalten und Funktionsmodell. Universität Stuttgart, 2015.

- /Sta20/ Statistisches Bundesamt: Nutztierhaltung in Deutschland. <https://de.statista.com/statistik/studie/id/46532/dokument/nutztierhaltung-in-deutschland/>, Stand: 24.09.2021.
- /Stä21/ Stähle, S.; Helling, R.: Orientierungswerte für Mineralölkohlenwasserstoffe (MOH) in Lebensmitteln, Berlin, 2021.
- /War15/ Warentest, S.: Mineralöle in Kosmetika: Kritische Stoffe in Cremes, Lippen-pfle-gepro-dukten und Vaseline. Stiftung Warentest, 2015.
- /Wen24/ Wenzel, L.: Mineralöl in Lebensmitteln und Kosmetik: Ist das bedenklich? Ökotest, 2024.