

Bernburg  
Dessau  
Köthen



**Hochschule Anhalt**  
Anhalt University of Applied Sciences

**emw**

Fachbereich  
Elektrotechnik, Maschinenbau  
und Wirtschaftsingenieurwesen

## Bachelorarbeit

**Aldo Schmeil**

---

Vorname Nachname

Maschinenbau, 2010, 4052330

---

Studiengang, Matrikel, Matrikelnummer

Thema:

**Untersuchung der Temperaturprobleme an  
der Hinterachse eines Kommunalfahrzeugs  
und die Erarbeitung von Lösungsvorschlägen  
für deren Beseitigung**

Prof. Dr. Hans-Heino Hiekel

---

Vorsitzende(r) der Bachelorprüfungskommission/1. Prüfer(in)

Prof. Dr. Kärmer

---

2. Prüfer(in)

12. 01. 2015

---

Abgabe am

## **Kurzzusammenfassung**

Angaben zum Autor:

Aldo Schmeil, geboren am 17. Juni 1989 in Wismar

Titel/ Aufgabenstellung der Arbeit:

Untersuchung der Temperaturprobleme an der Hinterachse eines Kommunalfahrzeuges und die Erarbeitung von Lösungsvorschlägen für deren Beseitigung.

Art der Arbeit:

Bachelorarbeit

Beschreibung der Arbeit:

Die vorliegende Bachelorarbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung und Bearbeitung von Temperaturproblemen an der Hinterachse eines Spezialfahrzeugs. Anhand der Hinterachse eines SysTrac140 werden Untersuchungsprozesse und Lösungswege zur Beseitigung dieser Probleme präsentiert, weshalb die Arbeit von materieller Relevanz für das Unternehmen sein kann. Der Arbeit sind entsprechende wissenschaftliche Recherchen vorausgegangen.

Jahr:

2015

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, Aldo Schmeil, dass die Arbeit selbständig verfasst, in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht in einem anderen Studiengang als Prüfungsleistung vorgelegt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen, einschließlich der angegebene oder beschriebenen Software, verwendet wurden.

Magdeburg, den 15. Januar 2015

## Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung .....	II
Selbstständigkeitserklärung .....	III
Inhaltsverzeichnis .....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Symbolverzeichnis.....	VII
Abbildungsverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis .....	IX
Formelverzeichnis .....	X
1. Einleitung.....	1
1.1 Einführung und Motivation.....	1
1.2 Unternehmensvorstellung und Fahrzeugvorstellung.....	2
1.3 Aufgabenstellung und Vorgehensweise .....	3
1.4 Mögliche Ergebnisse.....	4
2. Analyse der Problemstellung .....	5
2.1 Problembeschreibung .....	5
2.2 Mögliche Ursachen für die Erwärmung der Hinterachse .....	6
2.3 Auswirkungen auf das Fahrzeug, Fahrzeugfunktionen und Bauteile .....	7
3. Stand der Technik.....	8
3.1 Aufbau, Wirkung und Funktionsweise der Hinterachse .....	8
3.2 Die Bremse .....	11
3.2.1 Grundlagen der Bremsanlage .....	11
3.2.2 Grundlagen der Lamellenbremse .....	12
3.2.3 Die CARRARO DRIVETECH Lamellenbremse .....	14
4. Analyse der Temperaturprobleme .....	18
4.1 Der Achsprüfstand .....	18
4.1.1 Aufbau des Achsprüfstandes.....	18
4.1.2 Die Funktionsweise des Achsprüfstandes .....	22
4.2 Der Erhebungsprozess der Temperaturmessdaten .....	22
4.2.1 Die Drehzahlberechnung.....	24
4.3 Darstellung und Auswertung der Temperaturmessergebnisse .....	25
5. Maßnahmen zur Beseitigung der Temperaturprobleme .....	29
5.1 Luftspieländerung an der Lamellenbremse .....	29
5.2 Einsatz einer Sinus-Lamellenbremse.....	35

5.3 Lösung über einen permanenten Allradantrieb .....	36
5.4 Einbau einer externen Kühlung .....	37
6. Zusammenfassung und Ausblick .....	38
Quellenverzeichnis .....	40
Anlagen.....	43

## **Abkürzungsverzeichnis**

Abb.	Abbildung
DPF	Dieselpartikelfilter
DOC	Dieseloxydationsfilter
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
MALI	Markus Liebherr
PN	Positionsnummer
26.25.M	Typenbezeichnung der Hinterachse

## Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Dimension
$A_{\text{Reib}}$	Reibfläche	$\text{mm}^2$
$i$	Übersetzung	o.D.
$M_{\text{Reib}}$	Moment	Nm
$n$	Drehzahl	U/min
$p$	Druck	bar
$p_{\text{Reib}}$	Spezifische Flächenpressung	$\text{N/m}^2$
$r_m$	Schwerpunkthalbmesser	mm
$T$	Temperatur	$^{\circ}\text{C}$
$v$	Geschwindigkeit	km/h
$z_{\text{Reib}}$	Anzahl der Reibflächen	o.D.
$\varnothing_R$	Reifendurchmesser	mm
$\vartheta$	Temperatur	$^{\circ}\text{C}$
$\mu$	Reibungskoeffizient	o.D.
$\nu$	kinematische Viskosität	$\text{mm}^2/\text{s}$
$\pi$	mathematische Kreiskonstante	o.D.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Systrac140 im Mäheinsatz .....	3
Abb. 2: AGROVER .....	3
Abb. 3: Viskositäts-Temperaturverhalten eines Schmieröls.....	8
Abb. 4: feststehende Achse .....	9
Abb. 5: umlaufende Achse mit Achszapfen .....	9
Abb. 6: Kegelrad-Differential .....	10
Abb. 7: Hydraulisch betätigte Lamellenbremse mit Öleinführung .....	14
Abb. 8: Carraro Lamellenbremse .....	15
Abb. 9: Feststellbremse betätigt.....	16
Abb. 10: Feststellbremse gelöst.....	17
Abb. 11: automatischer Nachsteller.....	18
Abb. 12: Achsprüfstand.....	19
Abb. 13: Systematische Darstellung Achsprüfstand .....	21
Abb. 14: Temperaturverteilung der Hinterachse .....	25
Abb. 15: Darstellung der Temperaturmessdaten der Hinterachse des SysTrac140.....	27
Abb. 16: Demontage der Hinterachse .....	30
Abb. 17: Darstellung der Temperaturmessdaten der Hinterachse des SysTrac140 mit vergrößertem Luftspiel .....	33

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Erläuterung Achsprüfstand.....	20
Tabelle 2: einzustellende Drehzahlstufen .....	25
Tabelle 3: Temperaturbereiche .....	25
Tabelle 4: Temperaturmessdaten der Hinterachse des SysTrac140 .....	26
Tabelle 5: Temperaturmessdaten der Hinterachse des SysTrac140 mit vergrößertem Luftspiel.....	32

## **Formelverzeichnis**

Formel 1: Reibmoment .....	12
Formel 2: Umfangsberechnung .....	24
Formel 3: Drehzahlberechnung .....	24
Formel 4: maximale Eingangsdrehzahl .....	24

## **1. Einleitung**

Der SysTrac140 ist ein Spezialfahrzeug, das zu unterschiedlichen Zwecken überwiegend in Kommunen eingesetzt wird. Die Anforderungen der Kommunen an ein Fahrzeug sind äußerst vielschichtig, da eine Vielzahl von Aufgaben erfüllt werden muss. Das erfordert, ein Spezialfahrzeug mit größtmöglicher Flexibilität und Nutzerfreundlichkeit im Einsatz, gepaart mit höchster Effizienz in Einklang zu bringen. Der SysTrac140 vereint diese Anforderungen auf bisher unerreichte Weise durch die Kombination modernster Technologie und innovativem Antriebs- und Nutzungskonzept. Dabei trägt der SysTrac140 mit mehreren Mäh-, Streu-, Räum- und Transportanwendungen im Kommunaleinsatz Rechnung [1].

Nicht nur die Anforderungen an die Nutzung der technischen Fähigkeiten, sondern auch die vom Gesetzgeber geforderten Normen im Bereich des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes sind ausschlaggebend für die Konkurrenzfähigkeit des ab 2015 in Serie gehenden SysTrac150. Dabei wird die neue Abgasnorm (Stufe 3B) mit dem Einsatz eines Dieselpartikelfilters (DPF) und eines Dieselloxidationskatalysators (DOC) erfüllt. Außerdem werden die Ansprüche einer umweltschonenderen Kraftstoffverbrennung gewährleistet [2].

### **1.1 Einführung und Motivation**

Im Rahmen des Bachelorstudiengangs „Maschinenbau“ an der Hochschule Anhalt ist nach Beendigung der Prüfungsleistungen die Bearbeitung der Bachelorarbeit vorgesehen. Dabei wird jedem Studenten die Möglichkeit gegeben, sein zuvor erlerntes theoretisches Wissen aus dem Studium und seine praktischen Kenntnisse aus dem Berufspraktikum in einem Unternehmen oder an der Hochschule anzuwenden [18].

Die SysTrac GmbH in Schönebeck repräsentiert ein sehr interessantes und geeignetes Unternehmen zur Bearbeitung einer Bachelorarbeit. Diese Firma ist ein aufstrebendes, mittelständiges Unternehmen in der Spezialfahrzeugbranche und bietet durch den Einsatz innovativer Kommunaltechnik optimale Bedingungen für die Bearbeitung einer Abschlussarbeit [2]. Die zahlreichen Kombinationsmöglichkeiten zwischen Fahrzeug und Anbaugerät und die damit verbundenen technischen und konstruktiven Alternativen sind ein weiterer Indikator für die Wahl des Unternehmens. Ferner ergeben sich nach Beendigung des Studiums gute Chancen auf dem Arbeitsmarkt in dieser Branche. Die Bearbeitung der Bacheloraufgabe erstreckte sich von Oktober 2014 bis Januar 2015. Dabei lagen die Tätigkeitsfelder überwie-

gend in den Bereichen Recherche, Simulation am Prüfstand, Montage und Demontage der Hinterachse.

## **1.2 Unternehmensvorstellung und Fahrzeugvorstellung**

Die SysTrac GmbH blickt auf eine noch sehr junge Unternehmensgeschichte zurück. Im Jahr 2012 gründete Thomas Richter das mittelständische Unternehmen, welches aus der MALL Spezialfahrzeuge GmbH (Markus Liebherr) hervorgegangen ist. Das Unternehmen siedelte sich in Schönebeck (Sachsen-Anhalt) an und konzentriert sich hauptsächlich auf die Entwicklung, Konstruktion, Produktion und den Vertrieb von Spezialfahrzeugen, insbesondere für kommunale Zwecke, aber auch auf den Fahrzeugkabinen- und Spezialgetriebebau. In der momentanen Produktpalette befinden sich der „SysTrac140“ und der „AGROVER“ [1]; [2]. Der erste SysTrac wurde im Jahr 2013 fertig gestellt. Seit der Gründung des Unternehmens wurden innerhalb von zwei Jahren 20 Fahrzeuge gebaut. Ziel ist es, in Zukunft 30 Fahrzeuge im Jahr zu produzieren. In den Bereichen der Fahrzeugsteuerung und der Hydraulik kooperiert das Unternehmen mit externen Entwicklern der Firmen DriCoSoft aus Ägypten und Hydac aus Deutschland. Im Unternehmen sind derzeit neun Mitarbeiter beschäftigt. Die Kommunalfahrzeuge werden über eine Partnerschaft, bestehend aus sechs Händlern in Deutschland und einem in Österreich, für nahezu jeden Anwendungsbereich vertrieben [2].

In der nachfolgenden Abbildung 1 (Abb.) ist der „SysTrac140“ im Mäheinsatz zu sehen. Er besitzt bei einem zulässigen Gesamtgewicht von 13 t eine Außenbreite von 2100 mm, zuschaltbaren Allradantrieb, Allradlenkung, Kraftheber und Zapfwellen vorn und hinten sowie eine zulässige Achslast von 6,5 t vorne und 7 t hinten. Weiterhin verfügt der Bediener über vier An- und Aufbaubereiche, eine Schnellwechselplatte vorn und eine Zwei-Personen-Fahrerkabine. Durch die lastschaltbare, gefederte Lenktriebachse mit Niveauregulierung und 100 Prozent Differenzialsperre ist er für jedes Gelände bestens ausgerüstet. Zudem bietet die optionale hydrostatische Allradlenkung mit vier Lenkvarianten höchste Funktionalität und besten Komfort. Anbaugeräte, die eine Seitenauslage besitzen (siehe Abb. 1), werden zusätzlich durch die Möglichkeit, die optionale Federung selektiv links oder rechts zu sperren, stabilisiert [2].

Herzstück des SysTrac140 ist ein hochmodernes, stufenlos-leistungsverzweigtes Getriebe. Dieses Getriebe gewährleistet kontinuierliches Fahren im optimalen Drehmomentbereich des Motors und sorgt somit dauerhaft für den höchsten Wirkungsgrad. Dies reduziert den

Kraftstoffverbrauch erheblich. Durch das schalt- und ruckfreie Fahren werden Motor und Getriebe geschont, der Verschleiß gesenkt und der Fahrer entlastet [1].



**Abb. 1: Systrac140 im Mäheinsatz [1]**

In der Abb. 2 ist der für das „Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und Automatisierung IFF“ entwickelte AGROVER abgebildet. Dieses Chassis mit Antrieb wurde für den Kunden „Leibniz-Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung“ für Forschungsaufgaben in der Landwirtschaft erprobt und eingesetzt [1]. Noch in diesem Jahr soll ein weiteres Modell mit kundenspezifischen Anforderungen entwickelt und produziert werden [2].



**Abb. 2: AGROVER [1]**

### **1.3 Aufgabenstellung und Vorgehensweise**

Die Aufgabenstellung ist folgendermaßen formuliert:

*Untersuchung der Temperaturprobleme der Hinterachse eines Kommunalfahrzeugs und die Erarbeitung von Lösungsvorschlägen für deren Beseitigung.*

Es wird darauf hingewiesen, dass die Aufgabe der Arbeit lediglich darin besteht Lösungsvorschläge für die Beseitigung der Temperaturprobleme zu präsentieren. Um eine Fehlinterpretation zu vermeiden, ist es wichtig darauf hinzuweisen, dass keine endgültige Lösung präsentiert wird. Nach der Untersuchung der Aufgabenstellung ergeben sich folgende grundlegende Arbeitsschritte und drei Hauptschwerpunkte, die sich der Praktikant als Rahmen vorgegeben hat. Alle für die Untersuchung der Hinterachse relevanten Materialien und die Messtechnik sind in der firmeneigenen Werkstatt vorrätig. Zum Einstieg in das Thema wurden Gespräche mit Mitarbeitern geführt, um einen Überblick über die Fahrzeuge zu erhalten und um im Voraus Kenntnisse über etwaige Besonderheiten zu bekommen, die für die weitere Bearbeitung Voraussetzung sind. Anschließend erfolgt eine Literaturrecherche zum Aufbau und der Funktion technisch relevanter Bauteile. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Hinterachse, einschließlich aller dazugehörigen Komponenten. Mit diesem Wissen erfolgt die Erörterung von möglichen Ursachen für die zu starke Erwärmung der Achse. Um bestimmte Ursachen auszuschließen; erfolgt eine Wärmeverteilungsanalyse unter Last auf dem Achsprüfstand. Die Ergebnisse dieser Analyse dienen der Lokalisierung des Bauteils, welches für die übermäßige Erwärmung verantwortlich ist. Diese Prüfstandsanalyse ist der erste Hauptschwerpunkt, den sich der Praktikant vorgegeben hat. Aufgrund der Prüfstandsanalyse wird eine Temperaturanalyse auf dem Achsprüfstand in Bezug auf das kritische Bauteil vorgenommen, bei der konkrete Temperaturmessungen durchgeführt werden. Die beiden weiteren Vorgaben sind zum einen für die Auswertung der Prüfstandsergebnisse und die Analyse der Ursache der Erwärmung und zum anderen für die Erarbeitung von Lösungsvorschlägen wichtig. Im Zuge der Erarbeitung von Lösungsvorschlägen wird nach einer Umbaumaßnahme eine erneute Temperaturanalyse folgen. Die Messwerte beider Temperaturanalysen werden miteinander verglichen und ausgewertet. Zur fehlerfreien Durchführung der Aufgabe ist es unabdingbar im ständigen Austausch mit einem Vorgesetzten des Unternehmens oder dem betreuenden Professor zu stehen, um Ergebnisse kritisch zu reflektieren bzw. thematisch nachzusteuern.

#### **1.4 Mögliche Ergebnisse**

Die Untersuchung der Hinterachse auf Temperaturprobleme kann mehrere bzw. unterschiedliche Gründe haben. Die wahrscheinlichste Ursache der zu starken Erhitzung der Hinterachse liegt in der eingesetzten Bremsenart. Dabei handelt es sich um eine innen liegende, in Öl laufende (nasse) Lamellenbremse [3; S. 125]. Um zu untersuchen, ob der Grund der Erhitzung im inneren Aufbau der Bremse liegt, wird auf dem Achsprüfstand eine Tempera-

turverteilungsanalyse vorgenommen. Dieser kann entnommen werden, in welchen Bereichen der Achse die höchsten Temperaturen herrschen und infolgedessen ist die Quelle der Erhitzung lokalisierbar. Ein mögliches Ergebnis der Temperaturverteilungsanalyse ist:

Je näher die Messung im Zentrum der Achse und somit der Bremse liegt, desto höher die gemessenen Temperaturen.

Demzufolge wäre die Ursache der Erhitzung die eingesetzte Bremse. Nach dieser Temperaturverteilungsanalyse wird der kritische Bereich untersucht und es werden konkrete Temperaturmessergebnisse präsentiert. Aufgrund dieser Ergebnisse werden Lösungsvorschläge zur Beseitigung der Temperaturprobleme erarbeitet und auf die Umsetzbarkeit geprüft. Ein mögliches Ergebnis unter der Voraussetzung der vorherigen Annahme wäre der Einsatz einer anderen Bremse.

## **2. Analyse der Problemstellung**

Unter diesem Gliederungspunkt wird das bestehende Temperaturproblem an der Hinterachse des SysTrac140 beschrieben und analysiert.

### **2.1 Problembeschreibung**

Die SysTrac GmbH lieferte seit dem Jahr 2012 zwanzig Fahrzeuge in Deutschland und Österreich aus. Zwei dieser Fahrzeuge wiesen während bzw. kurz nach der Benutzung durch den Kunden deutlich sichtbare Risse bzw. Abplatzungen des Lacks, Ölleckagen an Dichtungsflächen, defekte Entlüftungsschrauben und verschmorte Kabel an der Hinterachse auf. Diese Auffälligkeiten sind Indizien für eine nicht normgerechte Erhitzung im Bereich der Hinterachse. In beiden Fällen traten diese Phänomene während der Fahrt langer Strecken, sogenannter Überführungsfahrten, mit relativ hohen Geschwindigkeiten in bergigen Regionen, auf. Die Kunden nahmen, um sich von einer zu starken Erhitzung der Hinterachse zu überzeugen, Temperaturmessungen mittels eines Messfühlers bzw. Messlasers vor. Dabei stellten sie Temperaturen an der Hinterachse von lokal mehr als 150° C am Achsgehäuse fest. Die eingesetzte Hinterachse ist laut Hersteller CARRARO DRIVETECH für dauerhafte Temperaturen von bis zu 120° C und temporären Peaks von bis zu 150° C ausgelegt [3]. Die vom Hersteller ausgelegte maximale Temperatur für die Erwärmung des Öls in der Hinterachse bezieht sich allerdings auf das Innere der Achse (Öltemperatur). Da die Messungen des Kunden jedoch nur oberflächlich durchgeführt werden konnten, ist von einer höheren Erwärmung im Inneren der Achse auszugehen. Da das Öl u. a. für die Kühlung

verantwortlich ist, erwärmt es sich schneller als z.B. das Achsgehäuse. Die Messungen der Kunden werden nicht als Grundstein für weiterführende Betrachtungen verwendet, da dabei schon Fehler aufgetreten sein könnten und keine geprüfte systematische Temperaturanalyse durchgeführt wurde. Zur Überprüfung wird eine firmeninterne Temperaturanalyse auf einem Achsprüfstand vorgenommen. Es ist zu berücksichtigen, dass die Probleme bei zwei von 20 Fahrzeugen aufgetreten sind und in beiden Fällen die gleiche Fahrbelastung vorausgegangen ist. In den folgenden Abschnitten werden die aufgetretenen Temperaturprobleme auf ihre Ursache und längerfristige Folgen untersucht und Maßnahmen für eine mögliche Beseitigung präsentiert.

## **2.2 Mögliche Ursachen für die Erwärmung der Hinterachse**

Da die Erwärmung der Hinterachse an zwei Fahrzeugen mit dem gleichen Belastungsmuster aufgetreten ist, ist davon auszugehen, dass bei beiden Fahrzeugen die gleiche Ursache besteht. Tatsache ist, dass die Erwärmung erst nach einer längeren Belastungszeit (einer bestimmten Fahrzeit mit einer gewissen Geschwindigkeit in bergigen Regionen) auftritt. Diese Randbedingungen lassen darauf schließen, dass die übermäßig starke Erwärmung durch die Bremse hervorgerufen wird. In der Hinterachse ist eine sogenannte Lamellenbremse (genauerer Aufbau und die Funktionsbeschreibung in Abschnitt 3.2), die aus einem Paket von beschichteten Reibscheiben mit einem tolerierten Luftspiel zwischen den einzelnen Lamellen besteht [4; S. 246]; [5; S. 22]. Es existiert die Möglichkeit, dass die zu starke Erwärmung durch Reibung zwischen den Lamellen auf ein zu geringes Luftspiel zurückzuführen ist [6].

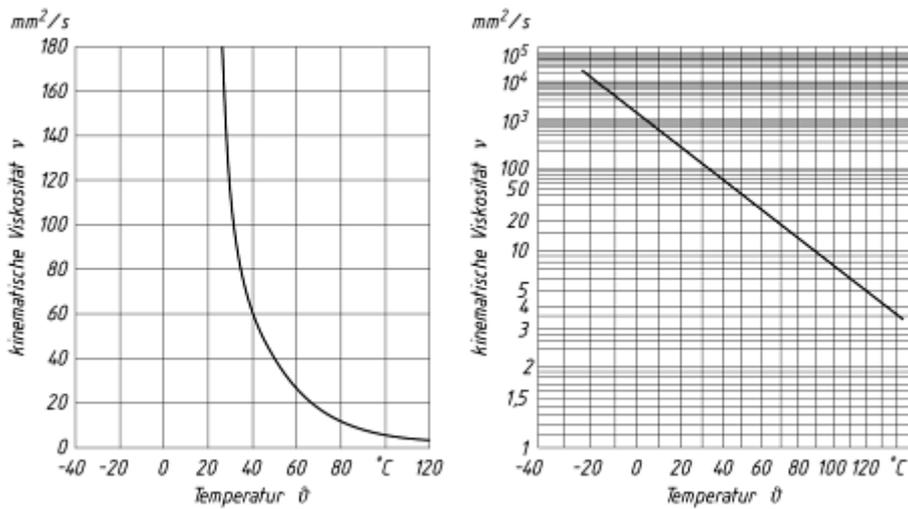
Die Überlegung besteht darin, dass der SysTrac140 auf einer Straßenfahrt mit maximaler Geschwindigkeit von 50 km/h in bergigen Regionen gefahren wird [3; S. 84]. Auf der Fahrt erwärmen sich die Achse und das darin befindliche Öl standardmäßig aufgrund von Bewegung und Reibung zwischen den Lagern und den Achswellen [7, S. 469]. Bis zu diesem Punkt unterscheiden sich die beiden Fahrzeuge mit den Temperaturproblemen nicht von denen ohne Temperaturprobleme. Die Theorie zur Ursache der Erwärmung liegt darin, dass in bergigen Regionen wesentlich häufiger und länger gebremst wird als in flachen Regionen und sich die Bremse demzufolge schneller und stärker erhitzt. Infolgedessen dehnen sich die Lamellen bei dieser Beanspruchung stärker aus als bei der Fahrt in flachen Regionen. Wenn nun das Luftspiel zwischen den Lamellen auf das kleinste Maß der vorgegebenen Toleranz eingestellt ist, reiben die Reibscheiben auch bei nicht Betätigen der Bremse aneinander und die Temperatur steigt bis, in die unter Abschnitt 2.1 beschriebenen Regionen

von 150° C und höher. Auf dem Prüfstand wird eine dauerhafte Fahrbelastung unter den Voraussetzungen eines geringen und großen Luftspiels simuliert und eine Erhitzung provoziert. Damit würde sich die Ursache der Erwärmung bestätigen und relativ einfach beheben lassen.

### **2.3 Auswirkungen auf das Fahrzeug, Fahrzeugfunktionen und Bauteile**

Die starke Hitzeentwicklung hat nicht nur auf das Fahrzeug, diverse Funktionen und einzelne Bauteile negative Auswirkungen. Das dauerhafte Überschreiten der maximal zulässigen Temperatur führt zu einer schleichenden Verkokung der für das Abdichten der Achse zuständigen O-Ringe und Wellendichtringe und somit zu Leckagen [8]. In der Abb. 3 ist die Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur verdeutlicht. Auf der linken Abb. ist die lineare Darstellung verdeutlicht und auf der rechten Abb. die  $\lg \nu - \vartheta$ -Darstellung. Dabei ist zu erkennen, dass sich der Einfluss der Viskosität mit zunehmender Temperatur deutlich verringert. Aufgrund dessen wird häufig die  $\lg \nu - \vartheta$ -Darstellung, bei der sich der Temperatureinfluss vereinfacht als Gerade darstellen lässt, verwendet. Durch das Einzeichnen einer Geraden ergibt sich bei der Verwendung der  $\lg \nu - \vartheta$ -Abhängigkeit der Vorteil, dass sich mit den Ergebnissen der Viskositätsmessungen von zwei Temperaturen, die Viskositäten beliebiger anderer Temperaturen bestimmen lassen [9, S. 77]. Es besteht jedoch kein systematischer Zusammenhang zwischen Schmierfähigkeit und Viskosität. Daher ist es in der heutigen Zeit nicht möglich, ein geeignetes Prüf- oder Analyseverfahren über den Zusammenhang von Viskosität, hohe örtliche Temperaturen, Druckverhältnisse und geeignetes Schmierverhalten anzuwenden [4; S. 121]; man ist auf praktische Erfahrungswerte angewiesen. Diese besagen, zweifelsohne eine schnellere Alterung, daraus resultierenden Schmierverlust und damit erhöhten Verschleiß bei längerfristiger Überhitzung des Öls. In besonderen Fällen kann es zu einer schrittweisen Verkokung und weiterführenden sukzessiven Verbrennung des Öls führen [2]. Die Hinterachse (genauerer Aufbau und die Funktionsbeschreibung in Abschnitt 3.1) beinhaltet mehrere innen liegende Bauteile, die durch ein Mehrfunktionenöl "AGRIFARM STOU MC PRO 10W-40" geschmiert werden [5; S. 101]. Die Angabe "10W-40" des Öls weist auf die Viskositätsklasse hin. Alle anderen Angaben beziehen sich auf den Namen. Die sich u. a. in der Achse befindliche Lamellenbremse wird mit einem Zweiten, sogenannten Hydrauliköl betätigt, welches sich räumlich getrennt vom Mehrfunktionenöl befindet [3; S. 49]. Wie bereits beschrieben verlieren die O-Ringe und Wellendichtringe durch dauerhafte Überhitzung ihre Dichtwirkung.

Dies verursacht ein sukzessives Entweichen des Schmier- bzw. Hydrauliköls und schließlich ein Nachlassen der Schmier- und Bremswirkung.



**Abb. 3: Viskositäts-Temperaturverhalten eines Schmieröls [9; S. 77]**

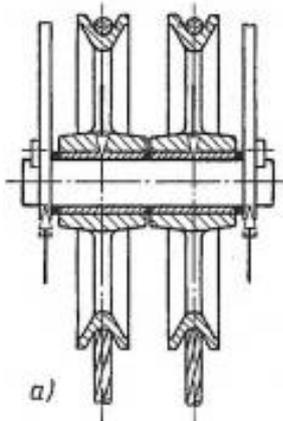
Alle Bauteile sind auf eine vom Hersteller bestimmte maximale Temperaturbelastung ausgelegt. Dies gilt bspw. für verwendete Lacke, Dichtungen, Klebverbindungen, Federn usw., bei denen die korrekte Funktionsweise nicht mehr gewährleistet werden kann [3; S. 57]

### 3. Stand der Technik

In diesem Abschnitt wird der aktuelle Stand der Technik beschrieben und in Bezug auf die wesentlichen Bauteile, die für die Problemlösung, eine aktive Aufgabe besitzen, in Aufbau, Wirkungs- und Funktionsweise eingegangen. Dabei werden Normen, Standards und aktuelle Trends in einer strukturierten Anordnung dargestellt.

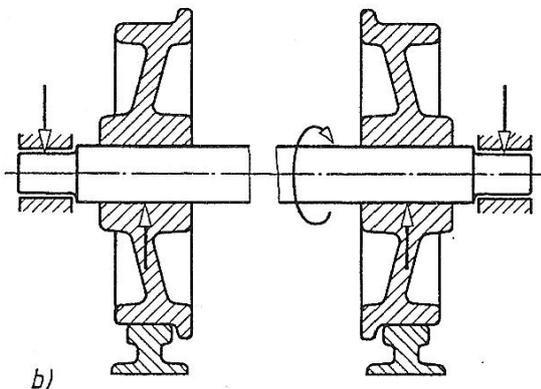
#### 3.1 Aufbau, Wirkung und Funktionsweise der Hinterachse

Achsen sind Elemente zum Tragen und Lagern von drehenden Maschinenteilen. Bei angetriebenen Fahrzeugen sind dies die Räder. Sie werden im Wesentlichen durch Querkräfte auf Biegung beansprucht, jedoch nicht auf Torsion, da sie keine Drehmomente übertragen [4; S. 11]. Es gibt zwei Arten von Achsen, die „Feststehenden Achsen“ und die „Umlaufenden Achsen“. Auf den erstgenannten drehen sich die gelagerten Teile, z.B. Seilrollen, lose. Diese weisen aufgrund der nur ruhend oder schwellend auftretenden Biegung günstige Beanspruchungsmerkmale auf [9; S. 341].



**Abb. 4: feststehende Achse [9; S. 341]**

Im Falle der zu untersuchenden Hinterachse handelt es sich um eine „Umlaufende Achse“, die sich mit dem feststehenden Bauteil (Rad) dreht. Diese werden wechselnd auf Biegung beansprucht, sodass ihre Tragfähigkeit geringer ist als die bei feststehenden Achsen gleicher Größe und gleichem Werkstoff. Sie weisen allerdings Vorteile hinsichtlich der Lagerung, Ein- und Ausbau sowie Reinigung und Schmierung der Lager auf, da die feststehenden Achsen aufgrund der umlaufenden Radnaben häufig sehr schwer zugänglich sind [9; S. 341].



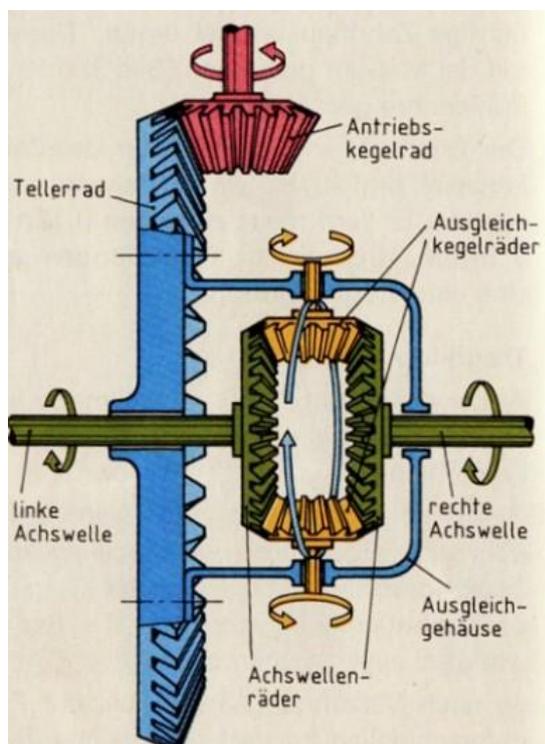
**Abb. 5: umlaufende Achse mit Achszapfen [9; S. 341]**

In der Anlage 1 ist die im SysTrac140 eingesetzte Hinterachse mit der Typenbezeichnung 26.25.M dargestellt. In den nachfolgenden Ausführungen wird auf die, für die Aufgabenstellung signifikanten Bauteile der Achse eingegangen.

Die Anlage 2 zeigt eine Schnittdarstellung der Hinterachse mit den Positionsnummern (1) bis (8). In der Schnittdarstellung ist nur die linke Seite der Achse abgebildet, da die rechte Seite baugleich ist. Anhand dieser Abb. werden die wichtigsten Bauteile beschrieben. Die Positionsnummer (PN) (7) zeigt die Gelenkwelle mit dem Antriebskegelrad, die das vom Motor erzeugte Drehmoment über ein Ritzel auf die linke und rechte Achswelle überträgt.

Die PN (2) ist das Differential oder auch Ausgleichsgetriebe genannt. Beim Differential treibt das Antriebskegelrad, welches mit der Gelenkwelle verbunden ist, das Tellerrad, welches mit dem Differentialgehäuse verschraubt ist, an. Im Differentialgehäuse sind die Ausgleichskegelräder drehbar gelagert und stehen mit den Achswellenrädern im Eingriff. Die Achswellenräder sind mit den Achswellen verbunden [10; S. 383]. Das Differential hat die Aufgabe Drehzahlunterschiede der Antriebsräder auszugleichen und Drehmomente zu gleichen Teilen an die Antriebsräder zu verteilen [10; S. 383]; [5; S. 95].

Wenn bspw. der Fall eintritt, dass ein Rad durchdreht und das andere, aufgrund schwieriger Bodenverhältnisse, still steht, erfolgt folgender funktioneller Ablauf: Das Achswellenrad des durchdrehenden Rades löst das Drehen der Ausgleichskegelräder, die sich auf dem stillstehenden Achswellenrad abwälzen, aus. Indem das durchdrehende Rad doppelt so schnell dreht wie das Tellerrad, wird der Drehzahlunterschied ausgeglichen. Die Drehmomentenverteilung richtet sich nach dem schlechter haftenden Rad und erfolgt zu gleichen Teilen an die Achswellenräder. Ein Vortrieb des Fahrzeugs wäre nicht möglich [10; S. 383]. Auf der Abb. 6 lassen sich die beschriebenen Bauteile und Funktionen optisch nachvollziehen.



**Abb. 6: Kegeldifferential [10; S. 383]**

Das nachfolgende Bauteil in der Anlage 2 mit der PN (3) ist die Lamellenbremse. Dieses Bauteil wird gesondert unter Punkt 3.2 beschrieben. Die PN (4) stellt das Achsgehäuse dar,

in bzw. an dem alle integrierten Bauteile befestigt sind. Deshalb kann es als Bauteilträger bezeichnet werden. Weiterhin dient das Achsgehäuse als eine Art Schmier- und Kühllölservoir. Die PN (5) stellt die lenkbar gelagerte Radaufhängung dar, darin integriert befindet sich ein Planetengetriebe (6) zur Drehzahlregulierung. Die Lenkung bzw. der Lenkwinkelschlag wird über die sogenannte, am zweiten Glied der Radaufhängung befestigten, Lenkstange realisiert.

## **3.2 Die Bremse**

### **3.2.1 Grundlagen der Bremsanlage**

Aufgrund der hohen technischen Anforderungen der heutigen Gesellschaft müssen auch Kommunalfahrzeuge den aktuellen Geschwindigkeits- und Leistungsansprüchen gerecht werden. Dabei spielt eine funktionstüchtige und zweckentsprechende Bremse eine zentrale Rolle, denn sie ist eine der wichtigsten Komponenten aller motorbetriebenen Fahrzeuge.

Die Funktionen von Bremsen sind [9; S. 359]:

- Verzögern sich bewegender Massen (Regel-, Betriebs- oder Stoppbremse)
- Erzeugen eines Gegenmomentes für Antriebsaggregate (Leistungsbremse)
- Festhalten einer Last (Halte- oder Feststellbremse)
- Momente weiterleiten
- Verbinden von bspw. Reibpaarungen.

Sie werden unterschieden in [9; S. 359]:

- Bauform
- Art der Reibpaarung
- Schmierung
- Art der Bedienung
- Schaltkraft.

Die Funktionen "Momente weiterleiten" und "Schalten (Trennen bzw. Verbinden)" können wie bei der Kupplung realisiert werden. Prinzipiell ist die Funktionsweise bei Bremsen und Kupplungen gleich. Der Unterschied zu Kupplungen besteht darin, dass sich beide Teile der Wirkpaarung drehen und beim Bremsen die Drehmomentübertragung zwischen einem beweglichen und einem fest mit dem Maschinen- bzw. Anlagengehäuse verbundenen Bauteil, welches das Gegenmoment aufnimmt, erfolgt. Technisch betrachtet sind dies gegenläufige Funktionen. Ein verlustfreies Leiten ist damit nur im Stillstand möglich

(Haltemoment). Der Vergleich zwischen Kupplungen und Bremse ist für die Grundlagen dieser Abhandlung essentiell, da alle bei Kupplungen nutzbaren physikalischen Effekte zur Krafterzeugung und -übertragung auch bei Bremsen verwendet werden. Daraus folgt, dass jede kraftschlüssige Kupplung auch als Bremse ausführbar ist und somit die Darstellung in Anlage 3 und Anlage 4 auch für die Einteilung von Bremsen gültig ist. Weiterhin ist die Umwandlung der kinetischen Energie, der sich bewegenden Bauteile, durch Reibung in Wärmeenergie und deren Abführung besonders zu beachten, da der Bremsvorgang (bei der Funktion als Bremse) wesentlich länger als der Schaltvorgang (bei der Funktion als Kupplung) dauern kann. Eine Einteilung der Bremsen erfolgt daher auch oft nach der Art der Energieumwandlung in [9; S. 359]:

- mechanische Bremsen (z.B. Backen-, Scheibenbremse)
- hydromechanische Bremsen (z.B. Strömungs-, Wasserwirbelbremse)
- elektrische Bremsen (z.B. Motor-, Industriebremse).

Dieser Vergleich ist für die Recherche unabdingbar, da in der Literatur ein Großteil der Darstellungen vom Thema Kupplungen geprägt sind.

### 3.2.2 Grundlagen der Lamellenbremse

Im SysTrac140 findet eine hydraulisch betätigte, in Öl laufende Lamellenbremse, aus dem Bereich der Scheiben- bzw. Mehrscheibenbremsen, ihre Anwendung [3; S. 125]. Durch mehrere hintereinandergeschaltete, abwechselnd mit Welle und festem Gehäuse verbundene Reibscheiben, sogenannten Innen- und Außenlamellen, wird im Vergleich zu Einscheibenbremsen die Anzahl der Reibungsflächen bei kleinerem Durchmesser der Scheiben, erhöht [11; S. 416]. Die inneren Scheiben werden als Reibscheiben (siehe Anlage 5) und die äußeren als Trennscheiben bezeichnet [5; S. 23]. Diese Lamellen werden beim Betätigen der Bremse durch den Fahrer axial zusammengepresst und erzeugen eine Reibungskraft, die über einen Hebelarm ein Reibmoment überträgt. Dieses Reibmoment setzt sich aus den Parametern Reibungskoeffizient  $\mu$ , spezifische Flächenpressung  $p_{\text{Reib}}$ , Reibfläche  $A_{\text{Reib}}$ , Schwerpunkthalbmesser  $r_m$  und Anzahl der Reibflächen  $z_{\text{Reib}}$  zusammen.

$$M_{\text{Reib}} = \mu \times p_{\text{Reib}} \times A_{\text{Reib}} \times r_m \times z_{\text{Reib}}$$

**Formel 1: Reibmoment [15; S. 291]**

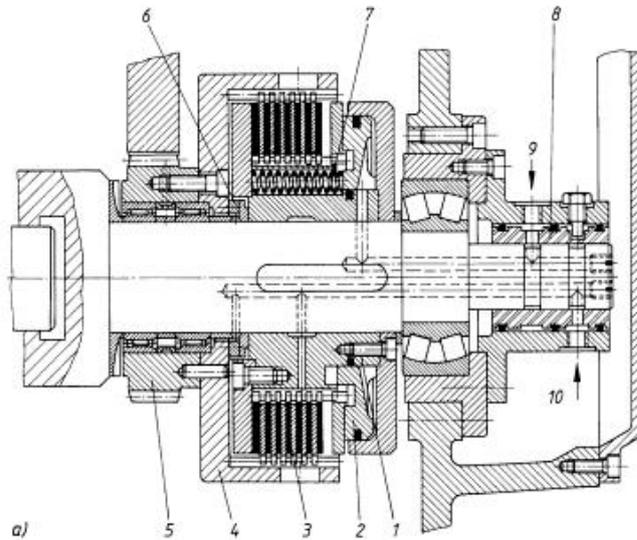
Im Off-Road- oder Landmaschinenbereich ist ein deutlicher Trend von trockenen Reibungsbremsen zu "nassen" im Ölbad laufenden Konzepten festzustellen, da diese anwendungs- und betriebstechnische Vorteile haben. Die entscheidenden Vorteile sind [15; S. 290]:

- sehr geringer Verschleiß
- nahezu wartungsfrei
- kein Abdichten gegen nasse Bauräume
- kompakte Bauweise
- hohe Betriebssicherheit
- sehr hohe Lebensdauer.

Aufgrund dieser Vorteile der nassen Lamellenbremse gegenüber den trockenen Bremsen werden sie teilweise als "Lebensdauer Bremsen" bezeichnet [15; S. 290]. Als Reibpaarungen der Lamellen eignen sich besonders Sintermetall gegen Grauguss oder Stahl. Die Vorteile bei diesen Paarungen sind gute Wärmeabfuhr bei hoher zulässiger Flächenpressung und konstante Reibungszahlen [19; S. 244]. Die Strukturen der Reiblamellen können folgendermaßen ausgeprägt sein (siehe Anlage 6) [19; S. 237]:

- gelocht
- mit Radialnut
- mit Kreuznut (fein, mittel, grob)
- mit Tangentialnut (in eine- oder zwei Richtungen)
- mit Spiralnut.

Die nachfolgende Abb. 7 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer hydraulisch betätigten nassen Lamellenbremse.



**Abb. 7: Hydraulisch betätigte Lamellenbremse mit Öleinführung [9; S. 445]**

Nachfolgend wird die Funktionsweise der hydraulisch betätigten nassen Lamellenbremse anhand der abgebildeten Positionsnummern erläutert.

Nach der Betätigung des Bremspedals durch den Fahrer ist der folgende Ablauf generiert: Durch die Beaufschlagung des Ringkolbens (PN 2) mit Drucköl wird das Lamellenpaket (PN 3), bestehend aus Innen- und Außenlamellen, zusammengepresst. Somit werden Innen- und Außenmitnehmer (PN 1 und PN 4) reibschlüssig miteinander verbunden. Durch die Entlastung des Ringkolbens (PN 2) vom Öldruck wird er mittels Druckfeder (PN 7) zurück gedrückt. Die von dem schrägverzahnten Zahnrad (PN 5) erzeugte axiale Zahnkraft wird von dem, zwischen Topfgehäuse (Außenmitnehmer) (PN 4) und Innenmitnehmer (PN 1) angeordneten Axialgleitlager (PN 6), aufgenommen. Bei Entlastung des Bremspedals durch den Fahrer, wird das Drucköl über die Bohrung (PN 9) und das Schmier- bzw. Kühlöl über Bohrung (PN 10) zurückgeführt. Die Abdichtung erfolgt dabei über die Buchse (PN 8) [9; S. 445].

### **3.2.3 Die CARRARO DRIVETECH Lamellenbremse**

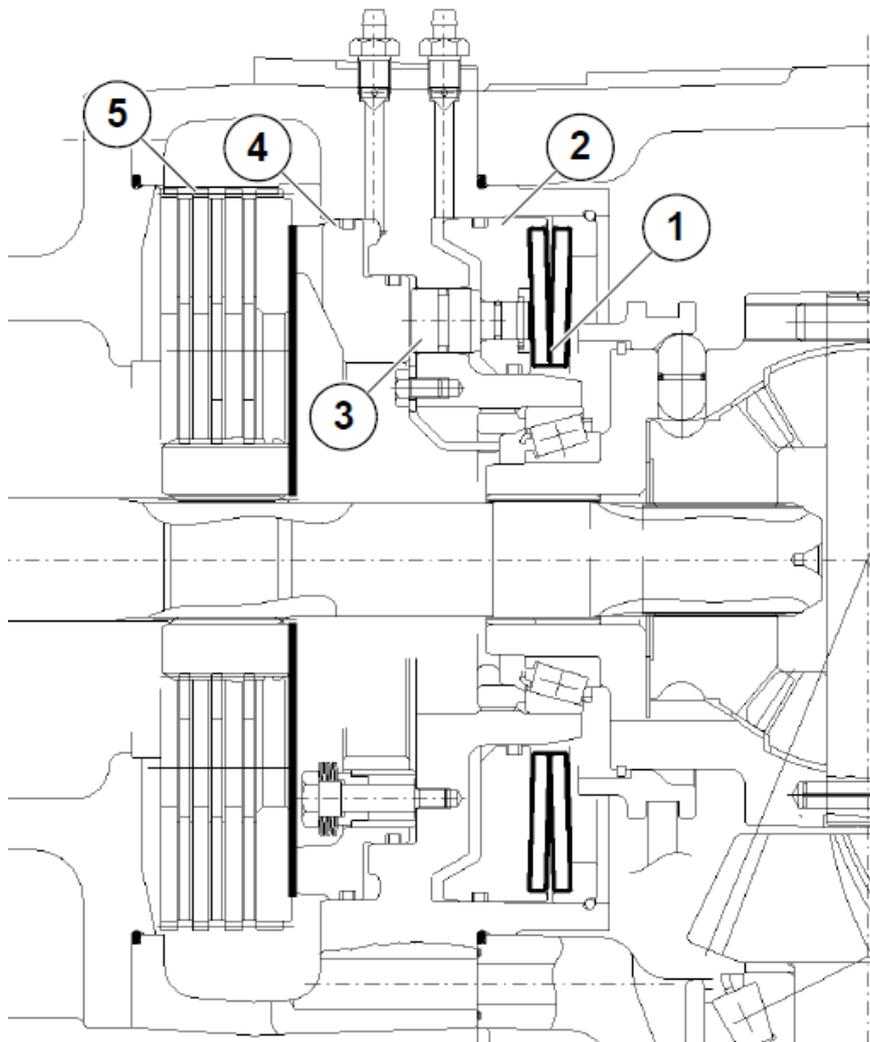
Unter dem Punkt 3.2.2 wurde der grundlegende Aufbau und die Funktionsweise einer Lamellenbremse erklärt. Prinzipiell sind die beschriebenen Merkmale dieser Bremsenart immer gleich. Die eingesetzte Lamellenbremse vom Hersteller CARRARO DRIVETECH weist jedoch einige Besonderheiten auf, die in diesem Abschnitt kurz erläutert werden.



**Abb. 8: Carraro Lamellenbremse [5; S. 82]**

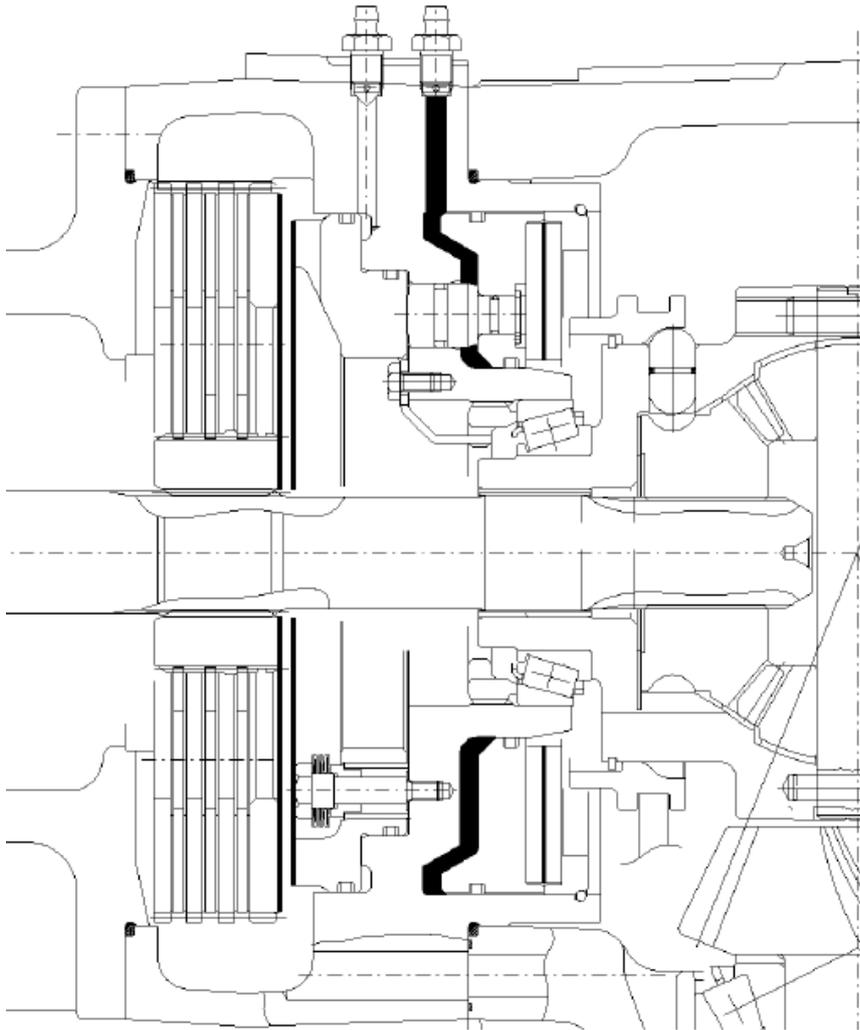
Das besondere Merkmal der eingesetzten CARRARO DRIVETECH Lamellenbremse ist eine Doppelfunktion als Betriebs- und Feststellbremse, d.h., dass zwei Bremsarten, funktionell unabhängig voneinander, über dasselbe Bremssystem Anwendung finden [5; S. 118]. Bei einer derartigen Kombination kann von einer Multifunktionsbremse gesprochen werden. In der Abb. 9 ist eine Schnittdarstellung der betätigten Feststellbremse dargestellt. Die Tellerfeder (PN 1) drückt den Kolben der Feststellbremse (PN 2) mit dem fest integrierten Verbindungsbolzen (PN 3), der wiederum den Kolben der Betriebsbremse (PN 4) betätigt und dieser somit das Lamellenpaket (PN 5) zusammendrückt. Die Feststellbremse ist, wie beschrieben, unabhängig vom Betriebszustand (Maschine Ein oder Aus) immer ohne Öldruck betätigt. Dieser Sachverhalt ist in Abb. 9 durch die nicht gefüllte Ölkammer dargestellt. Das Luftspiel zwischen den Lamellen wird mit der in Abb. 11 dargestellten Einstellschraube, über die Einschraubtiefe, deklariert (siehe Abb. 10; S. 16). Je tiefer die Einstellschraube eingeschraubt wird, desto kleiner ist das Luftspiel. Anders als die Feststellbremse wird die Betriebsbremse unter Öldruck betätigt. Wenn der Fahrer des SysTrac140 das Bremspedal betätigt, fließt Öl über den linken Einlaufstutzen, mit einem Druck von 40 bar, in die dafür vorgesehene Kammer. Daraufhin schiebt der Kolben der Betriebsbremse (PN 4) das Lamellenpaket zusammen und die Betriebsbremse greift. Sobald der Fahrer den Fuß vom Bremspedal nimmt, schwindet der Druck und der Kolben der Betriebsbremse wird durch die vorgespannte Tellerfeder an der Einstellschraube wieder zurückgezogen. Die Stärke der Außenlamellen beträgt 5 mm und der sich durch Verschleiß einstellende Abrieb darf maximal 0,1 mm betragen bis diese ausgetauscht werden müssen. Die Innenlamellen haben eine Stärke von 4,8 mm und der Abrieb bis zum Austausch darf 0,3

mm betragen. Die sich durch Verschleiß ergebene Differenz wird durch die Einstellschraube ausgeglichen [5; S. 23].



**Abb. 9: Feststellbremse betätigt [5; S. 119]**

In Abb. 10 ist eine Schnittdarstellung der gelösten Feststellbremse mit eingezeichnetem Ölverlauf dargestellt, der sich bei der Betätigung einstellt. Wenn der Fahrer den Schalter zum Lösen der Feststellbremse betätigt, fließt Öl mit einem Druck von 25 bar über den rechten Einlaufstutzen in die entsprechende Kammer. Dadurch drückt der Kolben der Feststellbremse (PN 2) auf die Tellerfeder (PN 1), die daraufhin nach hinten gedrückt wird. Aufgrund dessen wird der Verbindungsstift (PN 3) sowie der Kolben der Betriebsbremse (PN 4) zurückgezogen, der Druck vom Lamellenpaket (PN 5) genommen und die Feststellbremse dementsprechend gelöst. Dann stellt sich das durch die Einstellschraube deklarierte Luftspielmaß zwischen den Lamellen ein [5; S. 119].

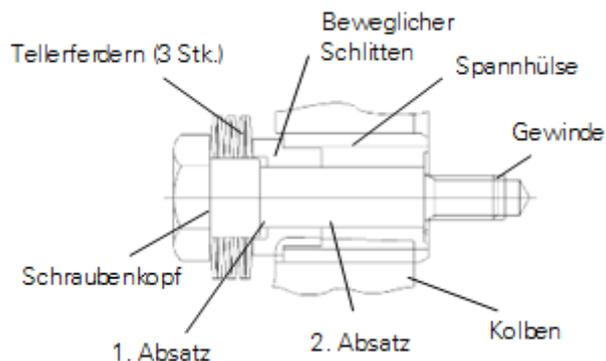


**Abb. 10: Feststellbremse gelöst [5; S. 119]**

Dass die Feststellbremse unter Druck gelöst und nicht betätigt wird, wie die Betriebsbremse, begründet sich darin, dass sich der Betätigungsdruck nicht halten würde, wenn das Fahrzeug ausgeschaltet ist. Im Fall einer technischen Störung, durch die das Fahrzeug nicht mehr fahrbereit ist und es abgeschleppt werden muss, ist in jedem Fahrzeug eine Ölhandpumpe, um die Feststellbremse lösen zu können. Diese wird mit einem hydraulischen Schraubverschluss von außen an den jeweiligen Einlaufstutzen angeschlossen [5; S. 119].

Ein entscheidendes Bauteil zur Bearbeitung der Problemstellung und für die korrekte Funktion der Lamellenbremse ist die Einstellschraube. Sie definiert das Luftspiel zwischen den einzelnen Lamellen durch die Einschraubtiefe. Im Laufe der Nutzungszeit verschleißt die beschichteten Lamellen langsam und das Luftspiel würde sich vergrößern. Durch die Tellerfedern und den beweglichen Schlitten befindet sich die Schraube und somit auch die Bremse bzw. das Lamellenpaket in eingebauter Lage immer unter Vorspannung. Sobald die

beschichteten Lamellen verschleifen, gleicht die Einstellschraube (automatischer Nachsteller) die entstehende Differenz selbstständig aus.



**Abb. 11: automatischer Nachsteller [5; S. 79]**

Die Einstellschraube ist vollständig mit der gesamten Gewindelänge in den Bremsenkäfig (siehe PN 14; Anlage 7) eingeschraubt. Je weiter die Schraube eingeschraubt ist, desto kleiner ist das Luftspiel. Aufgrund der Abmaße des Gewindes, der Einstellschraube und des Bremskäfigs befindet sich die Schraube in der maximalen Einschraubtiefe. Daraus ergibt sich das vom Hersteller CARRARO DRIVETECH voreingestellte Mindestluftspiel von 0,13 mm.

#### **4. Analyse der Temperaturprobleme**

In den folgenden Ausführungen wird die Hinterachse des SysTrac140 auf die Temperaturprobleme untersucht. Zunächst geht es um die Ursachenfindung der Erwärmung und anschließend um das Ausmaß.

##### **4.1 Der Achsprüfstand**

Auf dem Achsprüfstand wird eine Hinterachse in Bezug auf die Fahrbelastung in verschiedenen Drehzahlbereichen untersucht. Dabei wird zunächst eine Temperaturverteilungsanalyse vorgenommen um zu veranschaulichen, welches Bauteil für die Erwärmung verantwortlich ist. Anschließend werden Temperaturmessungen in konstanten zeitlichen Abständen getätigt, um nachzuweisen, wie stark die Erwärmung konkret ist.

###### **4.1.1 Aufbau des Achsprüfstandes**

Der Achsprüfstand setzt sich aus mehreren funktionellen Bauteilen zusammen, die in der nachfolgenden systematischen Darstellung abgebildet sind. Um die zu untersuchende Hin-

terachse realitätsnah (Einbaulage im Fahrzeug und Fahrgeschwindigkeit) belasten zu können, ist der korrekte Aufbau und Anschluss aller Elemente essentiell. In der systematischen Darstellung sind die wichtigsten Komponenten der Hinterachse und des Prüfstandes vereinfacht dargestellt, um die unter Punkt 4.1.2 beschriebene Funktionsweise nachvollziehen zu können.

Vor der Inbetriebnahme erfolgt die Montage einzelner Bestandteile des Prüfstandes. Zu Beginn wird die Achse mit vier Schrauben auf jeder Seite auf einen Montagetisch geschraubt und somit fixiert. Diese Einspannung symbolisiert die Einbauposition im Fahrzeug. Auf dem, durch Rollen beweglich gelagerten Montagetisch, wird die ca. 400 kg schwere Achse in Richtung des Antriebsmotors fixiert. Anschließend erfolgt die Verbindung von Antriebsmotor und Antriebswelle der Achse über die Gelenkwelle. Die Komponenten Motor und Schaltschrank stehen auf einem mit dem Fußboden fest verankerten Gerüst aus Stahlprofilen. Um ein Ausbrechen des Montagetisches der Achse bei einer plötzlichen Blockade der Antriebswelle während des späteren Betriebes zu vermeiden, wird dieser aus Sicherheitsgründen mit dem Stahlgerüst verschraubt. Nach diesen Montageschritten erfolgt der Anschluss des Hydraulikaggregates über die entsprechenden Schläuche am linken und rechten Einlaufstutzen der Feststellbremse an der Achse.

Im Anschluss an den Aufbau erfolgt die Verbindung mit dem Stromnetz und die Inbetriebnahme des Prüfstandes.

In der nachfolgenden Abb. ist der Achsprüfstand nach dem Anschluss mit den erforderlichen Komponenten (Hydraulikaggregat nicht im Bild) dargestellt.



**Abb. 12: Achsprüfstand**

Zum Vermeiden des gefährlichen Aufwickelns der Hydraulikschläuche ist darauf zu achten, diese in angemessenem Abstand zur rotierenden Radaufhängung zu befestigen. Ein weiterer sicherheitstechnischer Aspekt ist die Position des Not-Aus-Schalters und der Steuerung. Diese Funktionen sollten durch ein Verlängerungskabel außerhalb des Rotationsbereiches liegen, um den Bediener während des Prüfstandsbetriebes nicht zu gefährden. Zur Orientierung sind in der Tabelle die Positionsnummern den einzelnen Bauteilen bzw. Bestandteilen mit einer kurzen Funktionsbeschreibung zugeordnet. Zum Achsprüfstand gehören 6 Hauptpositionen mit diversen Unterpositionen.

Positionsnummer	Positionsname	Funktion
1	Stromquelle	Stromversorgung
2	Schaltschrank	Drehzahl- und Drehrichtungssteuerung, Not-Aus
3	Motor	Antrieb
4	Gelenkwelle	Drehzahl-, Drehmoment weiterleiten, Versatzausgleich
5	Hinterachse	Tragende Funktion
5.1	Differential	Ausgleich von Drehzahl unterschieden
5.2	Lamellenbremse	Betriebs- u. Feststellbremse
5.3	Planetengetriebe	Drehzahlregelung
5.4	Radaufhängung	Radaufnahme
5.5	Einlaufstutzen (außen)	Anschluss Hydraulikleitung; Betriebsbremse
5.6	Einlaufstutzen (innen)	Anschluss Hydraulikleitung; Feststellbremse
6	Hydraulikaggregat	Zum Lösen der Feststellbremse
6.1	Motor	Antrieb der Pumpe
6.2	Pumpe	Fördert Öl
6.3	Druckbegrenzungsventil	Druckregelung
7	Manometer	Druckanzeige

**Tabelle 1: Erläuterung Achsprüfstand**

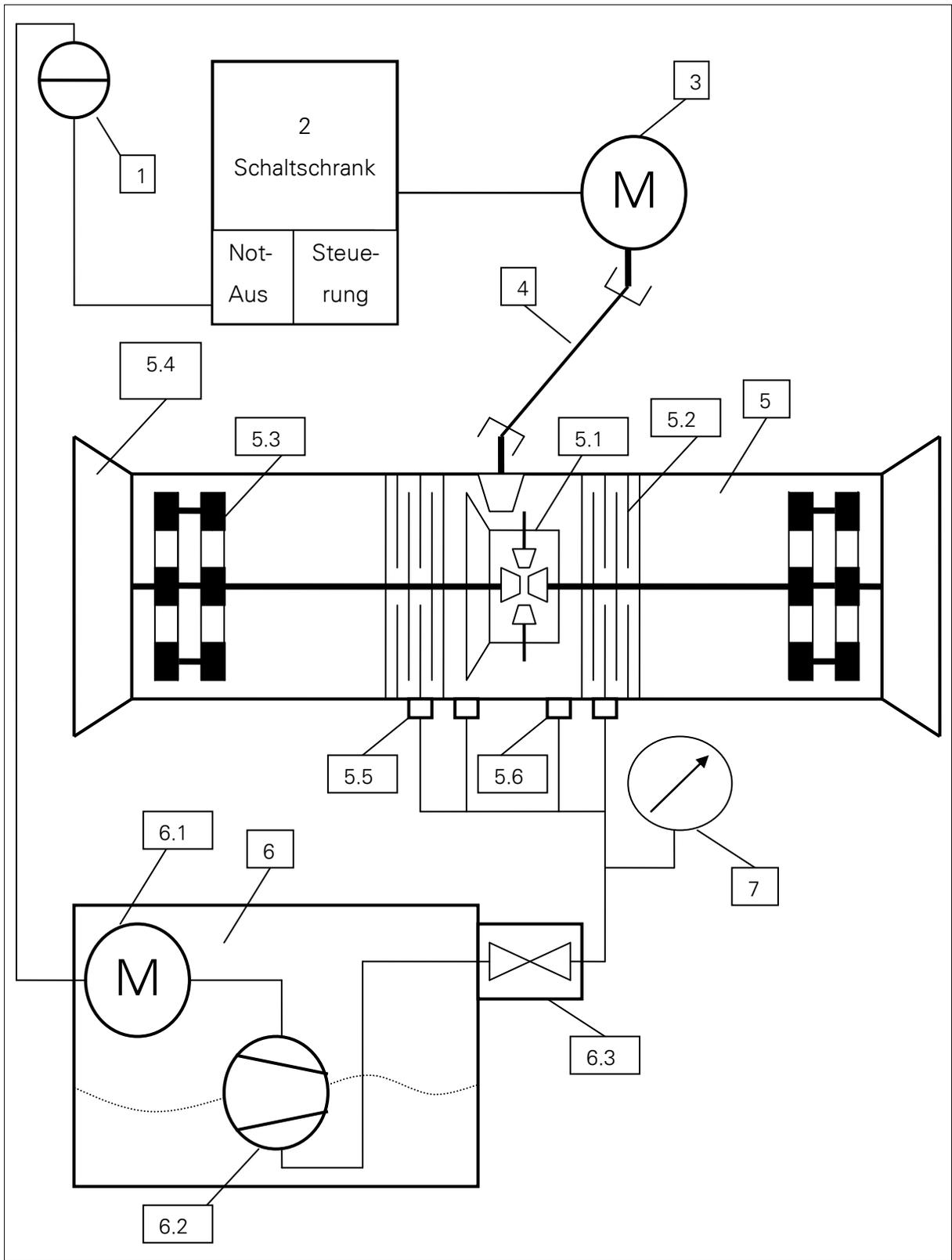


Abb. 13: Systematische Darstellung Achsprüfstand

### **4.1.2 Die Funktionsweise des Achsprüfstandes**

Zur Simulation des Fahrbetriebes treibt der Elektromotor die mit der Gelenkwelle verbundenen Antriebswelle der Achse an. Über eine sich im Schaltschrank befindliche Steuerung ist es möglich, die Drehzahl und die Drehrichtung zu regulieren. Die Drehrichtung ist während des gesamten Betriebes rechts (Vorwärts). Im Fall der maximalen Geschwindigkeit von 50 km/h beträgt die einzustellende Eingangsdrehzahl 2845 U/min. Die Drehzahlberechnungen einschließlich des Übersetzungsverhältnisses folgt unter Punkt 4.2.1. Die mit dem Motor verbundene Gelenkwelle leitet die erzeugte Last über die Antriebswelle und das Differential an die linke und rechte Achswelle weiter. Das Hydraulikaggregat ist für das Lösen und spätere Betätigen der Feststellbremse verantwortlich. Die sich in der Hydraulikeinrichtung befindliche Pumpe wird durch einen separaten Motor angetrieben. Sie fördert das Öl über Hydraulikschläuche an die dafür vorgesehenen Positionen. Die Feststellbremse wird mit einem Öldruck von 25 bar betätigt. Durch die Voreinstellung des Druckbegrenzungsventil ist es möglich, den benötigten Öldruck über die Leitungen und die Einlaufstutzen an die Feststellbremse weiterzuleiten und sie somit zu betätigen oder zu lösen. Nach der zuvor beschriebenen Reihenfolge der Abläufe am Prüfstand wird die Feststellbremse zunächst gelöst und nach Beendigung der Temperaturmessungen wieder betätigt. Die Betriebsbremse wird bei der Simulation nicht betätigt um die Messergebnisse nicht zu verfälschen.

### **4.2 Der Erhebungsprozess der Temperaturmessdaten**

Nachdem die Hinterachse, wie unter Punkt 4.1.1 beschrieben, aufgebaut und wie unter Punkt 4.1.2 erläutert, angeschlossen wurde, erfolgt die Inbetriebnahme und die Erhebung der Messdaten.

Vor der Erhebung der konkreten Messdaten wird die Hinterachse für drei Stunden in einem mittleren Drehzahlbereich betrieben. Nach dieser Laufzeit erfolgt die Temperaturverteilungsanalyse. Wie in den Vorüberlegungen ausgeführt, handelt es sich dabei um die Bereiche der Lamellenbremse (links und rechts vom Differential), auf die sich die nachfolgenden Messungen beziehen werden, da die Bereiche mit einer weniger starken Wärmeentwicklung für die Ergebnisse irrelevant sind. Nachdem sich die Achse wieder auf Raumtemperatur abgekühlt hat, erfolgen die Messungen im Bereich der Bremse. Vor der Inbetriebnahme werden die Anfangsparameter, wie Raum- und Achstemperatur vermerkt. Sobald die Feststellbremse gelöst ist, wird die erste von fünf festgelegten Eingangsdrehzahlen in Höhe von 1000 U/min über die Steuerung am Schaltschrank eingestellt. Es werden Messungen der Öltemperatur

im Inneren der Achse, als auch außen am Achskörper vorgenommen. Die äußeren Messungen (links und rechts) werden im Abstand von 15 min mit einem Temperaturmesslaser getätigt. Die Messungen werden auf beiden Seiten, am Achsgehäuse auf Höhe der Einbaulage der Lamellenbremse vorgenommen. Da sich die Lamellenbremse links und rechts vom Differential befindet und sich die Seite, auf dem das Tellerrad verbaut ist, schneller erwärmt, werden auf beiden Seiten Messwerte genommen [5; S. 70]. Für die Temperaturmessung im Inneren der Hinterachse wird eine der drei Kontrollschrauben auf jeder Seite entfernt [5; S. 75]. Anschließend wird mit einem Temperaturmessfühler die Öltemperatur (nur ein Wert, da sie beidseitig nahezu identisch ist) gemessen. Sobald sich die Temperatur der Achse im vorgegebenen Turnus nicht mehr wesentlich erhöht, wird die Drehzahl auf die nächste Stufe reguliert bis die maximale Drehzahl von 2845 U/min erreicht ist. Dies geschieht mit dem Ziel, die Hinterachse stufenweise zu erhitzen und um eventuelle Probleme in geringen Drehzahl- bzw. Geschwindigkeitsbereichen aufzuzeigen. Die Messungen im Inneren der Achse erfolgen aus zeitlichen Gründen am Anfang, am Ende und im Zuge der jeweiligen Drehzahländerungen, da in dieser Phase ein kurzzeitiger Stillstand des Prüfstandes keine verfälschenden Auswirkungen auf die Ergebnisse hat.

In der unter Punkt 4.3 abgebildeten Tabelle werden die Temperaturmessergebnisse dargestellt. Die Tabelle ist in die für die Auswertung relevanten Parameter Messung, Eingangsdrehzahl in U/min, Messzeit in Minuten und Innen- und Außentemperatur (links und rechts) der Hinterachse unterteilt. Es werden 36 Messungen im Intervall von 15 min vorgenommen. Die Messungen werden eingestellt, sobald keine weiter steigende Erwärmung zu messen ist. Die festgelegten Drehzahlstufen betragen 1000, 1500, 2000, 2500 und 2845 U/min.

Die äußeren Messungen werden mit einem Infrarot-Temperaturmesslaser aus einer Entfernung von ca. 20-30 cm vorgenommen. Die Messungen der Öltemperatur erfolgen mit einem Temperaturmessfühler. Der Messfühler hat eine Länge von 15 cm und wird über die Entlüftungsschraube in die Achse eingeführt.

## 4.2.1 Die Drehzahlberechnung

Zur Einstellung der maximalen Geschwindigkeit von 50 km/h erfolgt zuvor die Berechnung der einzustellenden Eingangsdrehzahl des Elektromotors [3; S. 84].

Gegebene Werte: Rad-/Reifendurchmesser:  $U_{\text{Reifen}} = 1156\text{mm}$  [1]

$$\text{Maximalgeschwindigkeit: } v_{\text{max}} = 50 \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad [1]$$

$$\text{Übersetzungsverhältnis: } i = 12,4 \quad [5; \text{S. 65}]$$

Gesuchter Wert:  $n_{\text{max,Eingang}}$  in  $\frac{U}{\text{min}}$

Berechnung:

$$U_{\text{Reifen}} = \pi \times \varnothing_{\text{Reifen}}$$

**Formel 2: Umfangsberechnung [12]**

$$U_{\text{Reifen}} = \pi \times 1156\text{mm}$$

$$\underline{U_{\text{Reifen}} = 3631,68\text{mm} \approx 3,63 \times 10^{-3} \text{km}}$$

$$n_{\text{max}} = \frac{v_{\text{max}}}{U_{\text{Reifen}}}$$

**Formel 3: Drehzahlberechnung [13]**

$$n_{\text{max}} = \frac{50 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{3,63 \times 10^{-3} \text{km}}$$

$$\underline{n_{\text{max}} = 13766,52 \frac{1}{\text{h}} \approx 229,44 \text{ 1/min}}$$

$$n_{\text{max,Eingang}} = n_{\text{max}} \times i$$

**Formel 4: maximale Eingangsdrehzahl [14]**

$$n_{\text{max,Eingang}} = 229,442 \text{ 1/min} \times 12,4$$

$$\underline{\underline{n_{\text{max,Eingang}} = 2845 \frac{U}{\text{min}}}}$$

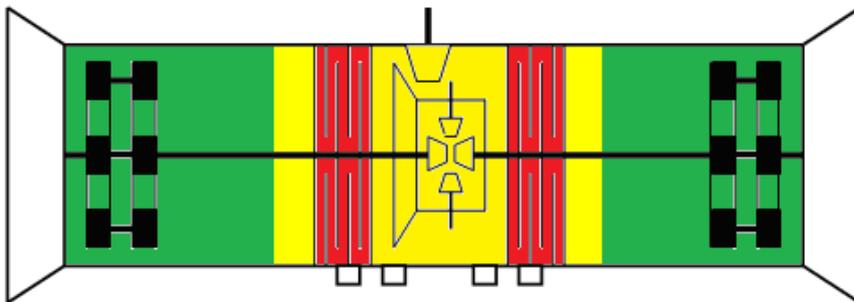
Die mit einem Drehzahlmesser an der Radaufnahme gemessene Abtriebsdrehzahl beträgt 230 U/min. Damit ist die Berechnung korrekt. Die nachfolgende Tabelle 2 zeigt die Geschwindigkeiten aller Drehzahlbereiche. Sie wurden mit denselben Formeln berechnet und dienen der Übersicht.

Drehzahl in U/min	Geschwindigkeit in km/h
1000	17,6
1500	26,4
2000	35,2
2500	43,9
2845	50,0

**Tabelle 2: einzustellende Drehzahlstufen**

### 4.3 Darstellung und Auswertung der Temperaturmessergebnisse

Die Temperaturverteilung bestätigt die im Vorfeld beschriebene Vorüberlegung und verdeutlicht, dass die übermäßige Erwärmung durch die Lamellenbremse hervorgerufen wird. Die nachfolgende Abb. veranschaulicht die Temperaturverteilung optisch. Nach der ersten unter Punkt 4.2 beschriebenen Inbetriebnahme des Prüfstandes ergab sich die folgende Hitzeverteilung (siehe Abb. 14 und Tabelle 3). Dabei sind die höchsten Temperaturen im Bereich der Lamellenbremse zu erkennen. Je weiter die Entfernung von der Lamellenbremse nach außen ist, desto kleiner die entstandenen Temperaturen.



**Abb. 14: Temperaturverteilung der Hinterachse**

Die nachfolgende Tabelle 3 bezieht sich auf die entstandenen Temperaturbereiche nach einer dreistündigen Anlaufzeit. Diese drei Bereiche, gekennzeichnet mit den Farben rot, gelb und grün, symbolisieren die Höhe der entstandenen Temperaturen nach drei Stunden.

Farbe	Temperaturbereich in ° C
	>85
	70 – 85
	50 – 70

**Tabelle 3: Temperaturbereiche**

Nachdem sich die Hinterachse wieder auf Raumtemperatur abgekühlt hat erfolgen konkrete Messungen des kritischen Bereichs, um festzustellen, wie stark sich die Achse erwärmt. Die nachfolgende Tabelle zeigt die gemessenen Temperaturen an der Hinterachse des SysTrac140. Die Raum- und Achstemperatur zu Beginn der Messungen beträgt 13,5° C.

Messung	Eingangsdrehzahl in U/min	Zeit in min	Temperatur (innen) in °C	Temp. (links) in °C	Temp. (rechts) in °C
1	1000	0	13,5	13,5	13,5
2		15		33,6	34,8
3		30		44,5	46,1
4		45		53,3	54
5		60		59	59,2
6		75		61,8	63
7		90	70,2	64	64,5
8	1500	105		68,2	68,2
9		120		72	72,7
10		135		75	76
11		150	82,5	75,8	76,2
12	2000	165		81,2	81,5
13		180		85,3	86,7
14		195		89,1	90
15		210	95,6	91,3	91,9
16	2500	225		96,8	97
17		240		101,7	102
18		255		104,5	104,5
19		270		108,5	109
20		285		111,5	112,8
21		300		113,8	114,9
22		315		114,6	115,5
23		330		116	116,5
24		345	120,4	117,6	118,5
25	2820	360		119,8	120
26		375		123,1	124
27		390		125,6	127,1
28		405		127,9	128,3
29		420		129,2	129,4
30		435		129,7	129,6
31		450		129,8	129,9
32		465		130	130
33		480		130,1	130,1
34		495		130,1	130,1
35		510		130	130
36		525	130,3	130,1	130,1

**Tabelle 4: Temperaturmessdaten der Hinterachse des SysTrac140**

In dem dargestellten Diagramm (Abb. 15) werden die erhobenen Messwerte der vorausgegangenen Tabelle 4, zur besseren Analyse, präsentiert. Auf der Primär-Ordinatenachse (links) ist die Drehzahl in U/min und auf der Sekundär-Ordinatenachse (rechts) ist die Temperatur in ° C dargestellt. Die Primär-Abszissenachse (unten) zeigt die Zeit in min und die Sekundär-Abszissenachse (oben) die damit verbundene jeweilige Messung. Im Diagramm sind zwei ansteigende Kurvenverläufe zu sehen. Der rote Verlauf zeigt die Messung der rechten Seite am Achsegehäuse und der blaue Verlauf steht für die Messung der linken Achsgehäuseseite. Die inneren Messungen des Öls werden punktuell durch grüne Rauten dargestellt.

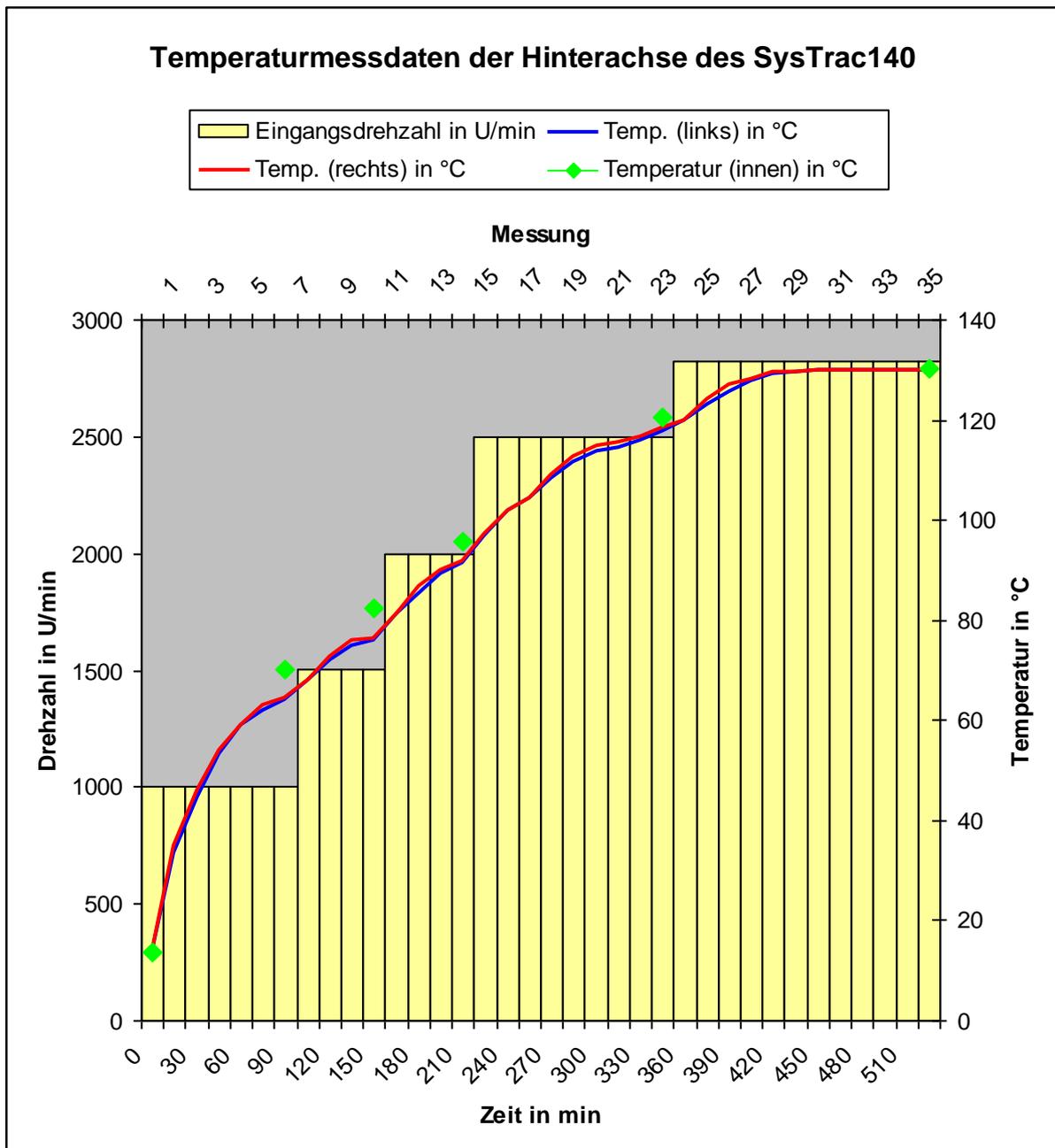


Abb. 15: Darstellung der Temperaturmessdaten der Hinterachse des SysTrac140

Laut Hersteller CARRARO DRIVETECH ist die Hinterachse für eine maximale Temperatur von 120° C ausgelegt [3]. Die Temperaturanalyse ergibt eine Erhitzung auf ca. 130° C. Während der Simulation des Fahrbetriebes auf dem Achsprüfstand erwärmt sich die Achse ohne die Betätigung der Betriebsbremse um etwa 10° C mehr, als vom Hersteller angegeben und auch zugelassen. Aufgrund dieser Analyse lassen sich die vom Kunden beschriebenen Mängel bestätigen. Der Prüfstand ist in einem geschlossenen Raum aufgebaut, dadurch sind die passiven bzw. subjektiven Merkmale für eine übermäßige Erhitzung leicht ersichtlich. Kurze Zeit nach dem Überschreiten der zulässigen Temperatur entwickelt sich sukzessive Rauch durch langsame Ölverbrennung. Des Weiteren entstehen an den kritischen Bereichen der Achse Risse im Lack. Diese Auffälligkeiten bestätigen die Aussagen der Kunden, wodurch die zu starke Erhitzung auffällig geworden ist. Es ist davon auszugehen, dass sich die Achse, wie vom Kunden beschrieben, in bergigen Regionen noch stärker erhitzt. Durch das ständige Betätigen der Betriebsbremse beim bergab Fahren, reiben die einzelnen Lamellen aneinander und erzeugen somit enorme Temperaturen. Daher ist es durchaus vorstellbar, dass sich die Achse noch stärker erwärmt und die vom Kunden gemessenen Temperaturen von 150° C erreicht werden.

Die Hinterachse des Systrac140 wird 525 min auf dem Achsprüfstand belastet und in Bezug auf die Temperaturprobleme untersucht. In dieser Zeit werden 36 Temperaturmessungen im 15 min Turnus getätigt, bis sich der energetische Gleichgewichtszustand einstellt. Dieser stellt sich ein, wenn die durch Reibung erzeugte Wärme, gleich der abgeführten Wärme ist [17]. Die Hinterachse erwärmt sich durch Reibung zwischen Lagern und Achswellen unter den gegebenen Bedingungen wie Drehzahl, Luftzirkulation im Messraum, Kühl- und Schmierwirkung des Öls und Raumtemperatur auf die Endtemperatur von ca. 130° C. Dieser Zustand deutet sich ab etwa 400 min bei beiden Kurvenverläufe an. Der streng monoton wachsende Anstieg und der Kurvenverlauf beschreibt eine Sättigungsfunktion, die einen Spezialfall der Exponentialfunktion darstellt [16; S. 103].

In den ersten 45 min steigt die Temperatur am schnellsten, bis sie sich nach 90 min im ersten Drehzahlbereich von 1000 U/min nur noch geringfügig ändert. Der allmählich abflachende Anstieg beider Kurven ist ein Indiz für die Sättigung der Kurven [16; S. 104]. Um eventuelle Auffälligkeiten in den kleineren Drehzahlstufen erkennen zu können, erfolgt die Erhöhung der Drehzahl auf die nächst festgelegte Stufe. Bei den Drehzahlbereichen 1500 U/min und 2000 U/min ist die Periode bis zur allmählichen Sättigung der Kurven mit 60 min Laufzeit kürzer als in der Anfangsphase. Weiterhin ist zu erkennen, dass sich die rechte Lamellenbremse etwas schneller bzw. stärker erwärmt. Dies liegt vor allem an der Einbaulage des Differentials. Wie unter Punkt 3.1 beschrieben, besteht das Differential vor

allem aus Antriebsrad und Tellerrad. Da sich das Tellerrad auf der rechten Seite befindet und durch die formschlüssige Verbindung Wärme erzeugt wird, erhitzt sich die rechte Seite der Hinterachse etwas schneller als die linke Seite. Die Innen- bzw. Öltemperatur der Achse liegt anfangs etwa  $6^{\circ}\text{C}$  über Außentemperatur. Je länger die Achse belastet wird, desto geringer wird die Temperaturdifferenz zwischen innerem und äußerem Messpunkt. Das liegt hauptsächlich an der langsamen Ausdehnung der Wärme. Wie die Tabelle 4 zeigt, dauert es etwa 30 min bis die Achse die Temperatur des Öls erreicht hat.

Die unter Punkt 2.1 beschriebenen passiven Merkmale für eine zu hohe Erhitzung der Hinterachse stellen sich auch bei der Prüfstandsbelastung ein.

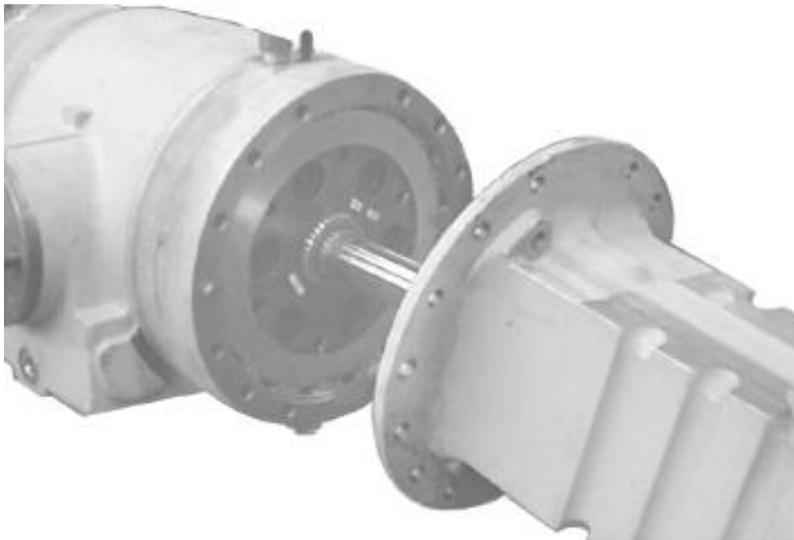
## **5. Maßnahmen zur Beseitigung der Temperaturprobleme**

Nachfolgend werden vier Maßnahmen zur Beseitigung der Temperaturprobleme mit verschiedensten Ansätzen analysiert. Dabei werden die technische Umsetzbarkeit, der konstruktive Aufwand, die gegebenen Platzverhältnisse sowie ökonomische und wirtschaftliche Faktoren untersucht und die effektivste Variante vorgeschlagen.

### **5.1 Luftspieländerung an der Lamellenbremse**

Die Auswertung der Temperaturvergleichsanalyse ergibt, dass die Lamellenbremse für die zu starke Erhitzung verantwortlich ist. Es besteht die Möglichkeit, dass sich die einzelnen Lamellen im Zuge der regulären Erwärmung ausdehnen und daraufhin permanent aneinander reiben. Somit erhitzt sich die Hinterachse, wie bereits untersucht, zu stark. Die Grundidee zur Behebung der Reibung und der damit verbundenen, übermäßigen Erhitzung besteht darin, das Luftspiel zwischen den Lamellen zu vergrößern. Um zu überprüfen, ob die übermäßige Erwärmung auf das zu geringe Luftspiel zwischen den Lamellen der Bremse zurückzuführen ist, werden die Messungen mit einem vergrößerten Luftspiel durchgeführt. Die unter Punkt 4.3 ausgewerteten Temperaturmessungen werden mit einem Luftspielmaß zwischen den Lamellen der Bremse von 0,13 mm durchgeführt. Dieses Maß ist vom Hersteller CARRARO DRIVETECH voreingestellt. Für die nachfolgenden Messungen wird das Luftspiel auf 0,26 mm verdoppelt. Anschließend werden die Messergebnisse analysiert und miteinander verglichen. Die Luftspieländerung erfolgt über die, unter Punkt 3.2.3 beschriebene Einstellschraube. Von dieser befinden sich drei Stück auf jeder Seite. Um den Rahmen der wissenschaftlichen Arbeit einzuhalten, beschränkt sich die Ausarbeitung auf die grobe Beschreibung der Demontageschritte und die Erläuterung des Prozesses in den

Grundstrukturen. Der Grundgedanke besteht darin, eine Luftspielvergrößerung vorzunehmen, um somit die Reibung zwischen den einzelnen Lamellen zu verringern. Die folgenden Demontageschritte beziehen sich auf die Zerlegung der Hinterachse um an die Einstellschrauben der Lamellenbremse zu gelangen. Wie auf der Abb. 15 ersichtlich, wird die Hinterachse beidseitig, durch das Lösen der Inbus-Schrauben, demontiert. Nachdem die Schrauben entfernt wurden, lassen sich die beiden Achsgehäusesseiten inklusive der Achswelle mithilfe eines Krans abnehmen. Nach diesen Arbeitsschritten liegen die Bremsen beidseitig frei.



**Abb. 16: Demontage der Hinterachse [5; S. 83]**

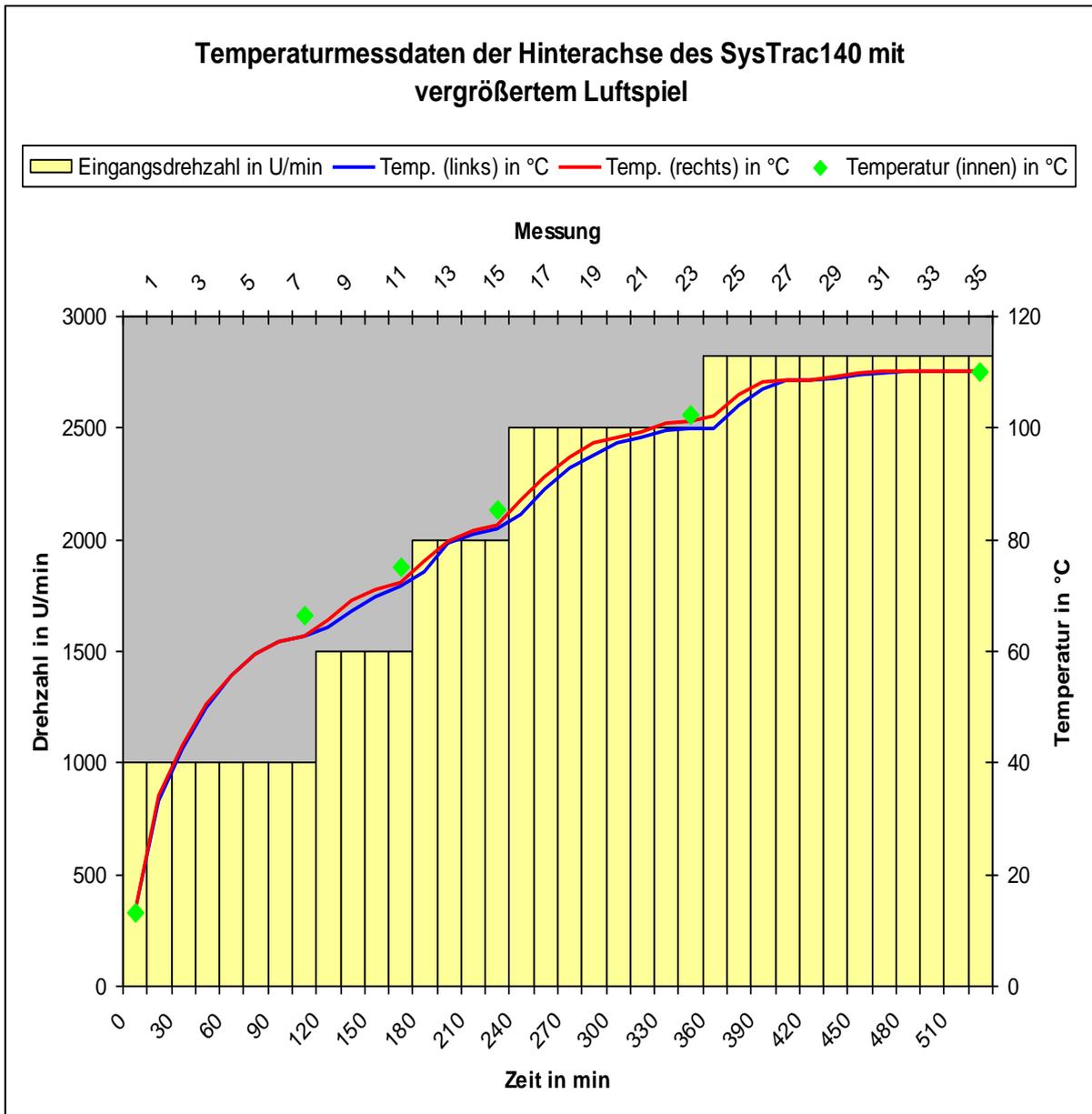
Die folgenden Beschreibungen beziehen sich auf die Explosionszeichnung der Anlage 7. Nach der Montage des Achsgehäuses lassen sich die Positionsnummern 25 bis 32 ohne Kraftaufwand oder der Verwendung von Werkzeugen aus dem Gehäuse herausnehmen. Die entnommenen Bauteile sind die Reib- und Trennscheiben der Lamellenbremse. Das nun sichtbare Bauteil mit der PN 23 ist der Kolben der Betriebsbremse. In diesem befinden sich die drei Einstellschrauben mit der PN 24. Wie bereits unter Punkt 3.2.3 beschrieben, reguliert die Einstellschraube mittels der Einschraubtiefe das Luftspiel zwischen den Lamellen. Zur Vergrößerung des Luftspiels werden spezielle Distanzscheiben mit einer Stärke von 0,13 mm auf das Gewinde geschoben, um die Einschraubtiefe zu minimieren (siehe Anlage 9). Diese Vorgehensweise wird beidseitig angewendet. Für die korrekte Funktionsweise der Einstellschraube ist beim Eindrehen darauf zu achten, dass die Tellerfedern korrekt auf dem 1. Absatz liegen und nicht verkanten. Die Schrauben bzw. Gewinde werden zur Sicherung mittels LOCTITE, einem Spezialklebemittel für Schrauben, eingeklebt. Alle weiteren Bauteile werden wieder originalgetreu montiert. Dabei ist darauf zu

achten, dass die Bohrungen der Reibscheiben miteinander fluchten, denn sie sind für eine optimale Zirkulation des Schmieröls verantwortlich. Weithin ist darauf zu achten, dass bei der Montage des Achsgehäuses der äußerst reißempfindliche O-Ring nicht beschädigt wird, da es ansonsten zu Leckagen kommt [5; S. 89].

Nach dem Umbau auf das größere Luftspielmaß wird die Achse erneut auf dem Achsprüfstand untersucht. Die Rahmenbedingungen (Aufbau, Erhebungsprozess, Diagrammbeschriftungen, Parameter usw.) sind die gleichen wie bei der ersten Inbetriebnahme des Prüfstandes. In der nachfolgenden Tabelle 5 sind die erhobenen Temperaturmessdaten der Hinterachse des SysTrac140 mit einem vergrößerten Luftspielmaß dargestellt. Aufgrund dieser Messungen wurde erneut ein Diagramm (Abb. 17) zum besseren optischen Verständnis angefertigt. Diese Daten werden analysiert und mit denen der ersten Temperaturmessungen aus Punkt 4.3 verglichen. Nach der Durchführung wird verglichen wie sinnvoll bzw. effektiv die Umbaumaßnahme der Lamellenbremse ist.

Messung	Eingangsdrehzahl in U/min	Zeit in min	Temperatur (innen) in ° C	Temp. (links) in ° C	Temp. (rechts) in ° C
1	1000	0	13,1	13,1	13,1
2		15		33	34,1
3		30		42,5	43
4		45		49,8	50,5
5		60		55,6	55,6
6		75		59,2	59,2
7		90		61,7	61,6
8		105	66,3	62,6	62,5
9	1500	120		64,2	65,5
10		135		67	69
11		150		69,5	71
12		165	75,1	71,6	72,3
13	2000	180		74	76
14		195		79,2	79,5
15		210		81	81,5
16		225	85,5	81,9	82,6
17	1500	240		84,5	86,8
18		255		89	91
19		270		92,6	94,7
20		285		95	97,1
21		300		97,3	98,3
22		315		98,3	99,3
23		330		99,5	100,8
24		345	102,5	99,7	101
25	2820	360		99,8	102
26		375		104,1	106
27		390		106,8	108,2
28		405		108,3	108,3
29		420		108,4	108,6
30		435		108,9	109,1
31		450		109,3	109,6
32		465		109,8	109,9
33		480		109,9	110
34		495		110	110
35		510		110	110,1
36		525	110,2	110,1	110,1

**Tabelle 5: Temperaturmessdaten der Hinterachse des SysTrac140 mit vergrößertem Luftspiel**



**Abb. 17: Darstellung der Temperaturmessdaten der Hinterachse des SysTrac140 mit vergrößertem Luftspiel**

Die Luftspielvergrößerung hat aus dem Vergleich mit dem Messdiagramm aus Punkt 4.3 einen sehr gut erkennbaren positiven Effekt erzielt. Nach dem Umbau der Hinterachse und der erneuten Belastungssimulation auf dem Achsprüfstand ergibt sich unter den gleichen Randbedingungen eine Endtemperatur von ca. 110° C. Somit ist bewiesen, dass der Grund für die übermäßige Erwärmung in dem zu geringen Luftspielmaß zwischen den einzelnen Lamellen der Bremse liegt. Nach dem Umbau erhitzt sich die Hinterachse um 20° C weniger als vor dem Umbau. Damit liegt die Temperaturbelastung im vorgegebenen Toleranzbereich. Die passiven bzw. subjektiven Indikatoren für eine Überhitzung, wie Rauchentwicklung oder

Risse im Lack, sind nicht zu verzeichnen. Somit sind die vom Kunden beschriebenen und gerechtfertigten sichtbaren Mängel behoben. Trotz der verbesserten Temperaturwerte besteht durch den vermehrten Einsatz der Bremse in bergigen Regionen die Möglichkeit einer größeren Erhitzung. Die zu erreichenden Temperaturen würden hingegen im Toleranzbereich liegen, da durch die Luftspielvergrößerung die gemessene Höchsttemperatur bei  $110^{\circ}\text{C}$  und demzufolge  $10^{\circ}\text{C}$  unter der maximal zulässigen Temperatur liegt. Außerdem würde es sich bei Temperaturerhöhungen durch den Einsatz der Betriebsbremse nicht um dauerhafte Überhitzungen handeln; es wären lediglich temporäre Peaks, die über  $120^{\circ}\text{C}$  liegen. Laut Hersteller CARRARO DRIVETECH ist die Hinterachse für temporäre Peaks von bis zu  $150^{\circ}\text{C}$  ausgelegt [3]. Damit liegt die Temperaturbelastung der Hinterachse durch diverse Fahreinflüsse nach dem Umbau innerhalb des vorgegebenen Toleranzbereiches.

Die umgebaute Hinterachse des Systrac140 ist ebenfalls 525 Minuten auf dem Achsprüfstand belastet und in Bezug auf die Temperaturänderungen untersucht worden. In dieser Zeit werden erneut 36 Temperaturmessungen im 15 min Turnus getätigt, bis sich der energetische Gleichgewichtszustand eingestellt und die Höchsttemperatur erreicht wird. Das Ziel der Maßnahme der Luftspielvergrößerung ist die Minimierung der Reibung zwischen den Lamellen, um somit die Höchsttemperatur der Achse zu senken. Die Kurvenverläufe ähneln denen der Messungen vor dem Umbau. Daher wird auf eine detaillierte Analyse der Kurvenverläufe verzichtet. Auffällig ist allerdings die konstant höhere Temperatur der rechten Bremse bis zur Sättigung der Kurven. Der Grund dafür liegt - wie bei den ersten Messungen - an der Auslegung des Differentials. Das Verhältnis der Innen- und Außentemperatur ist prinzipiell gleich. Je länger die Achse belastet wird, desto geringer wird die Temperaturdifferenz zwischen innerem und äußerem Messpunkt. Das liegt neben der langsamen Ausdehnung der Wärme vor allem an dem, unter Punkt 2.3. beschriebenen Viskositäts-Temperaturverhalten von Schmierölen. Wie schon bei den ersten Messungen, dauert es etwa 30 min bis die Achse die Temperatur des Öls erreicht.

Zusammenfassend betrachtet ist der erwünschte Effekt der Senkung der Erhitzung eingetreten. In welchen Temperaturbereichen sich die Senkung bewegen würde, konnte zuvor nicht abgeschätzt werden. Eine Senkung um  $20^{\circ}\text{C}$  ist ein sehr positives Ergebnis. Mit Ausnahme des geringeren Temperaturniveaus waren ähnliche Kurvenverläufe wie bei den ersten Messungen zu erwarten. Mit der Methode der Luftspielvergrößerung ist die Temperatursenkung relativ einfach durchführbar. Die im Zusammenhang mit der übermäßigen Erhitzung stehenden passiven bzw. subjektiven Merkmale sind infolge der Umbaumaßnahme nicht mehr aufgetreten. Aufgrund der Tatsache, dass keine die

Funktionsweise beeinträchtigenden Nebeneffekte aufgetreten sind, die Umbaumaßnahme demzufolge keine Auswirkungen auf andere Bauteile oder Funktionen hat, wird der Hersteller CARRARO DRIVETECH über die Umbaumaßnahme informiert. Mit der Intension, dass CARRARO DRIVETECH diese Umbaumaßnahme überprüft und eventuell bei allen zu produzierenden Neuachsen ein vergrößertes Luftspielmaß berücksichtigt.

## **5.2 Einsatz einer Sinus-Lamellenbremse**

Eine alternative Möglichkeit, die zu starke Erwärmung der Hinterachse zu vermeiden, ist der Einsatz einer verwandten Bremsenart. In den folgenden Betrachtungen wird immer von einem nicht betätigten Zustand der Bremse ausgegangen. Derzeit ist eine hydraulisch betätigte Lamellenbremse, wie unter Punkt 3.2.3 beschrieben, verbaut. Bei dieser Bremse kommt es, wie bereits umfassend untersucht, nach längerer Nutzungszeit zu einer übermäßigen Erhitzung durch Reibung zwischen den Lamellen.

Um diese Reibung zu vermeiden, besteht die Möglichkeit, die Innenlamellen sinusförmig auszuprägen. Diese wellenförmige Ausprägung vermeidet das Aneinanderhaften der Lamellen, indem keine Flächen-, sondern eine Punktberührung stattfindet bzw. der sich bildende Ölkeil ein Abheben der beiden Scheiben bewirkt [11; S. 416]. Die Funktionsweise ist prinzipiell identisch mit der der Lamellenbremse.

Die Sinus-Lamellen bewirken durch ihre Federwirkung ein weiches Bremsen, da während des Bremsvorganges eine stetige Vergrößerung der Reibungsflächen durch ein allmähliches Abflachen der Sinuslinie bis zur Belastung der gesamten Fläche erfolgt. Im nicht betätigten Zustand besteht nur Punkt- bzw. Linienberührung, sodass Erwärmung und Verschleiß unbedeutend klein im Vergleich zur nicht welligen Lamellenausführung sind [9; S. 439]. Die Anlage 9 zeigt eine Schnittdarstellung einer mechanisch betätigten Sinus-Lamellenbremse, um die Anordnung der Sinus-Lamellen optisch besser nachvollziehen zu können. Die Betätigungsart und die PN sind bei dieser Darstellung nicht relevant, da es ausschließlich um die Anordnung und Form der Sinus-Lamellen geht. Unabhängig von der Beseitigung der Temperaturprobleme könnte der Einsatz der sinusförmigen Lamellenbremse einen weiteren positiven Nebeneffekt besitzen. Die Bremse des SysTrac140 ist für ein zulässiges Gesamtgewicht von 13 t ausgelegt. Dementsprechend „scharf“ reagiert die Bremse bei der Betätigung, wenn keine bzw. wenig Ladung oder Anbauaggregate das Fahrzeug beschweren. Die wellenförmige Anordnung der Sinus-Lamellen würde federnd wirken, da während des Bremsvorganges eine stetige Vergrößerung der Reibungsflächen durch sukzessives Abflachen der

Sinuslinie bis der Kontakt der kompletten Reibfläche erfolgt. Dies könnte ein weiches Bremsen, ohne Wirkverlust, zur Folge haben.

Einen vergleichbaren Effekt, ohne den Einsatz einer anderen Bremse bzw. anders geformter Bremspakete, hätte der Einsatz sogenannter Spreizringe. Dabei würden die wellenförmig ausgeprägten Ringe zwischen die Lamellen gesetzt werden und somit den gleichen Effekt, der im Voraus beschrieben wurde, erzielen. Diese Variante wäre billiger und hätte einen geringen montagetechnischen Aufwand, da die Spreizringe mit ähnlichen Montageschritten wie bei der Luftspielvergrößerung verbaut werden würden. Weiterhin könnten sie zusätzlich zur Luftspielvergrößerung eingesetzt werden, um:

1. die Erwärmung noch weiter zu reduzieren und
2. den positiven Nebeneffekt des weichen Bremsens zu ermöglichen.

Der Einsatz der Spreizringe wäre in Kombination mit der Luftspielvergrößerung eine sehr effektive Möglichkeit, um zum einen die Temperaturprobleme zu beseitigen und zum anderen die Bremse zu optimieren. Der technisch konstruktive Aufwand wäre sehr gering und es ist von einer vertretbaren finanziellen Belastung durch die Umsetzung und Erprobung auszugehen. Zur Überprüfung der Realisierungsmöglichkeit müssten weitere Simulationen auf dem Achsprüfstand zur erneuten Untersuchung der Temperaturentwicklung und Bremsentests zur Überprüfung der Funktionalität folgen. Diese Untersuchungen würden den Umfang dieser Arbeit überschreiten, könnten jedoch in einer weiterführenden Abhandlung analysiert werden.

### **5.3 Lösung über einen permanenten Allradantrieb**

Die Reduzierung der Hinterachserwärmung durch einen permanenten Allradantrieb wäre denkbar, wenn die Temperaturverteilungsanalyse ergeben hätte, dass die primäre Erwärmung durch das Differential hervorgerufen werden würde. Das Differential ist durch das Ineinandergreifen von Tellerrad und Antriebskegelrad eine sekundäre Wärmequelle und durch die Lastverteilung würde der bereits beschriebene Hauptgrund für die zu starke Erwärmung nicht behoben werden. Daraufhin ist die Umsetzung eines permanenten Allradantriebes nur als zusätzliche Reduzierung der Temperatur denkbar. Derzeit besitzt der SysTrac140 einen Hinterachsantrieb, bei dem im Standardbetrieb die gesamte Leistung über die Hinterachse übertragen wird. Der Allradantrieb ist über ein hydraulisches System zuschaltbar, um in Situationen mit bspw. geringer Bodenhaftung oder steilen Anstiegen eine

uneingeschränkte Fahrzeugkontrolle zu besitzen. Zur Unterstützung des Allradantriebes kann eine sogenannte Differentialsperre an beiden Achsen zugeschaltet werden. Sie dient dazu, Schlupf an einem Rad mit geringer Bodenhaftung zu vermindern, indem es entweder den Antriebsstrang versteift oder mehr Drehmoment auf andere Räder mit besserer Bodenhaftung verteilt. Dadurch wird die Traktion vor allem bei Geländefahrten und sehr weichen Untergründen wie Wiesen oder Feldern verbessert. Bei normaler Straßen- und Kurvenfahrt sollte die Differentialsperre nicht zugeschaltet werden, da diese den erforderlichen Drehzahlunterschieden an den Rädern entgegenwirken würde [3; S. 93].

Um die Hinterachse zu entlasten, wäre theoretisch ein permanenter Allradantrieb vorstellbar. Dabei werden immer alle Räder angetrieben [10; S. 387]. Das erforderliche Verteilergetriebe, welches ein Mittendifferential mit Längssperre beinhaltet, leitet das Drehmoment weiter. Die Antriebskraft wird somit auf alle vier Räder verteilt und die zu starke Erwärmung der Hinterachse vermieden. Dies kann jedoch zu Verspannungen im Antriebsstrang zwischen Vorder- und Hinterachse führen und bedingt ein Längsdifferential. Dieses Längs- oder auch Mittendifferential gleicht Drehzahlunterschiede zwischen den Achsen aus und wirkt somit möglichen Verspannungen entgegen. Nachteilig am permanenten Allradantrieb ist ein höherer Kraftstoffverbrauch aufgrund des höheren Leergewichts.

Die Platzverhältnisse im Antriebsstrang des SysTrac140 wären vorhanden, um den Einbau der erforderlichen Komponenten für einen permanenten Allradantrieb zu gewährleisten [2]; [20]. Der Umbau auf einen permanenten Allradantrieb ist umsetzbar, allerdings bedarf diese Maßnahme einen hohen technischen und konstruktiven Aufwand. Finanziell würde sich der Aufwand nur bei einer seriellen Umsetzung lohnen, nicht jedoch als Maßnahme um in Einzelfällen die Temperatur der Hinterachse zu reduzieren.

#### **5.4 Einbau einer externen Kühlung**

Der Einbau einer externen Kühlung stellt eine weitere Möglichkeit dar, mit den Temperaturproblemen umzugehen. Der Kern dieser Variante ist es, eine Lösung für den Umgang mit den Temperaturen zu finden und nicht die Ursache zu beheben. Die Umsetzung einer externen Kühlung bedarf den Einsatz von Kühlrippen oder -schläuchen, diversen hydraulischen Anschlussstücken und einer Pumpe zur Förderung bzw. Zirkulation des Öls aus der Achse heraus und anschließend wieder herein. Das Kühl- bzw. Schmieröl wird dabei mittels einer Pumpe aus der Hinterachse gefördert und durchläuft anschließend die Kühlrippen. Aufgrund der geringen Platzverhältnisse wäre die Umsetzung mit einem extrem hohen konstruktiven Aufwand verbunden. Die Kühlaggregate könnten als flexible Schläuche

ausgeprägt auf der Hinterachse verlegt werden. Durch den Fahrtwind würde sich das in den Schläuchen befindliche Öl abkühlen und anschließend wieder in die Achse zurück gepumpt werden. Ob und in welchem Ausmaß der gewünschte Effekt der Ölkühlung stattfinden würde ist nicht zu prognostizieren. Weiterhin ist die Umsetzung mit einem hohen finanziellen und zeitlichen Aufwand verbunden und bedarf praktischer Tests zur Überprüfung der Effektivität.

## **6. Zusammenfassung und Ausblick**

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Ergebnisse der bearbeiteten Aufgabenstellung zusammengefasst und bewertet. Aufgrund verschiedener Lösungsmöglichkeiten ergeben sich Ansatzpunkte für weiterführende Arbeiten.

In den ersten Passagen der Arbeit wird die Problemstellung der übermäßigen Erhitzung der Hinterachse des Systrac140 auf mögliche Ursachen und Auswirkungen untersucht. Die daraufhin durchgeführte Belastungssimulation der Hinterachse auf dem Achsprüfstand ergibt, wie durch den Kunden beschrieben, eine zu starke Erwärmung.

Wie unter Punkt 1.4 prognostiziert, ist die Erwärmung auf die eingesetzte Lamellenbremse des Herstellers CARRARO DRIVETECH zurückzuführen. In diesem Zusammenhang bestätigen sich die getätigten Vorüberlegungen in Bezug auf die Ursache der Überhitzung der Hinterachse. Ohne den Einsatz der Betriebsbremse steigt die Temperatur der Achse auf dem Prüfstand auf etwa 130° C an und liegt somit deutlich über dem, durch den Hersteller tolerierten maximalen Wert von 120° C. Um die zu starke Erhitzung zu senken, werden verschiedene Ansätze zur Lösung der Problemstellung präsentiert.

Die Untersuchungen ergeben, dass die übermäßige Erhitzung durch ein zu geringes Luftspielmaß zwischen den Lamellen und dementsprechend durch Reibung innerhalb der Bremse entsteht. Die daraufhin erneut durchgeführte Prüfstandsanalyse mit vergrößertem Luftspielmaß ergibt eine Temperaturreduzierung von 20° C. Mit der Vergrößerung des Luftspielmaßes liegt die Erhitzung der Achse im Toleranzbereich. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden zusätzlich zur Luftspielvergrößerung drei weitere Möglichkeiten zur Temperatursenkung analysiert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den zusätzlichen Möglichkeiten zur Temperaturreduzierung ausschließlich um theoretische Ansätze und Vorüberlegungen handelt.

Die Variante des Einsatzes einer Sinus-Lamellenbremse ist theoretisch vorstellbar, denn sowohl die technische Umsetzung als auch der finanzielle Aufwand stellen keine großen Herausforderungen dar.

Aus der Idee des Einsatzes einer Sinus-Lamellenbremse kristallisierte sich eine weitere, ähnliche Möglichkeit zur Temperatursenkung heraus. Dabei handelt es sich um den Einsatz sogenannter Spreizringe zwischen den Lamellen der ursprünglich eingesetzten Bremse. Diese Spreizringe sollen ein aneinander Heften der Lamellen vermeiden und ein Abheben der Lamellen bewirken. Die Spreizringe würden denselben Effekt wie die Sinus-Lamellen erzielen. Die Variante „Spreizringe“ könnte in Kombination mit der Luftspielvergrößerung angewandt werden, um eine weitere Temperatursenkung zu bewirken. Außerdem ist die Überlegung, dass die Varianten Sinus-Lamellenbremse und Spreizringe das abrupte Bremsen in ein weiches Bremsen aufgrund einer optimierten Federwirkung innerhalb der Bremse ersetzt.

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, die Temperatur über eine alternative Lastverteilung mittels permanenten Allradantriebs zu realisieren. Wie bereits unter Punkt 5.3 analysiert, ist diese Möglichkeit nur in Kombination mit der Luftspielvergrößerung umsetzbar, da der Grund der Erwärmung weiterhin bestehen würde. Die Möglichkeit des Einsatzes einer externen Kühlung ist die vierte Möglichkeit die Temperaturprobleme zu behandeln. Allerdings wird auch bei dieser Variante nicht die Ursache der Erwärmung behoben. Außerdem ist die externe Kühlung, wie bereits analysiert, die technisch und konstruktiv aufwändigste und teuerste Alternative der Temperatursenkung. Die Lösung des permanenten Allradantriebes ist in Kombination mit der Luftspielvergrößerung eine Möglichkeit zur Temperatursenkung. Denn der permanente Allradantrieb würde, wie bereits erwähnt, die Ursache der Überhitzung nicht beheben würde. Es ist denkbar, dass der permanente Allradantrieb auf Kundenwunsch als Ausstattungsvariante des SysTrac140 oder in einem Nachfolgemodell in Betracht gezogen wird.

Abschließend ist zu sagen, dass die vorteilhaftesten Varianten zur Temperaturreduzierung die Sinus-Lamellenbremse und die Spreizringe wären. Es ist grundsätzlich als äußerst positiv zu bewerten, dass die Luftspielvergrößerung mit einfachen Mitteln eine derartige Senkung der Temperatur zur Folge hat. Es war in den Vorüberlegungen nicht abzuschätzen, wie stark der Effekt der Senkung der Temperatur einzuordnen ist. Die praktische Umsetzbarkeit der vorgeschlagenen Alternativen zur Temperatursenkung zu untersuchen wäre ein sehr interessanter Ansatz für weiterführende Arbeiten. Die Optimierung der Bremse, in Bezug auf die Bremswirkung ist ein ebenso interessanter und lohnenswerter Ansatz für weiterführende Untersuchungen.

Die Analysen und Messergebnisse werden dem Achshersteller mit der Bitte mitgeteilt, aufgrund der erhobenen Daten die Luftspielvergrößerung bei den in Zukunft zu produzierenden Achsen zu berücksichtigen.

## Quellenverzeichnis

- [1] SysTrac GmbH Spezialfahrzeugbau: Produkte; SysTrac140  
<http://www.systrac-sbk.com/produkte.html>.
- [2] SysTrac GmbH Spezialfahrzeugbau: Mitarbeitergespräch  
Thomas Richter.
- [3] MALI Spezialfahrzeuge GmbH [Hrsg.]: Betriebsanleitung; Kommunalfahrzeug/ Geräteträger: MALI trac. 1. Aufl., Technische Kommunikation, 2011.
- [4] Künne, B. [Hrsg.]: Köhler/ Rögnitz Maschinenteile 2: Kupplungen und Bremsen. 9. Aufl., Teubner Verlag, 2004.
- [5] Carraro Drivotech [Hrsg.]: Werkstatthandbuch: General Specifications. 5. Aufl., 2006/2007.
- [6] FH München [Hrsg.]: fh-muenchen.de: Umwandlung mechanischer Arbeit in Wärme;  
[http://dodo.fb06.fh-muenchen.de/lab\\_didaktik/pdf/web-arbeit-waerme.pdf](http://dodo.fb06.fh-muenchen.de/lab_didaktik/pdf/web-arbeit-waerme.pdf).
- [7] Schlecht, B. [Hrsg.]: Maschinenelemente 2: Getriebe, Verzahnungen und Kupplungen. 2. Aufl., Verlag Pearson Studium, 2010.
- [8] Oil-Tec GmbH: FAQ  
<http://www.eoil.de/pflanzenoel/faq.html>.
- [9] Wittel, H., Muhs, D., Jannasch, D., Voßiek, J. [Hrsg.]: Roloff/ Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung. 19. Aufl., Verlag Vieweg & Teubner, 2009.
- [10] Gescheidle, R. [Hrsg.]: Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik: Ausgleichsgetriebe. 28. Aufl., Europa Lehrmittel, 2004.
- [11] Haberhauer, H.: Bodenstein, F. [Hrsg.]: Maschinenelemente: Gestaltung, Berechnung, Anwendung. 16. Aufl., Verlag Springer, 2011.

- [12] Erbrecht, R., König, H., Martin, K., Pfeil, W., Wörstenfeld, W. [Hrsg.]: Das große Tafelwerk: Formelsammlung, 1. Aufl., 1999, S. 24.
- [13] CNC Lehrgang: kreisförmige Bewegung: Drehzahlberechnung  
<http://www.cnc-lehrgang.de/berechnungen-bei-kreisfoermigen-bewegungen/>.
- [14] kfz-tech: Übersetzungsverhältnis  
<http://www.cnc-lehrgang.de/berechnungen-bei-kreisfoermigen-bewegungen/>.
- [15] Breuer, B., Bill, K. [Hrsg.]: Bremsenhandbuch: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik, 4. Aufl., Verlag Springer, 2012.
- [16] Papula, L. [Hrsg.]: Mathematische Formelsammlung: Sättigungsfunktion, 9. Aufl., Verlag Vieweg, S.104 ff..
- [17] Lucas, K. [Hrsg.]: Thermodynamik: Die Grundgesetze der Energie- und Stoffumwandlungen, 6. Aufl. Verlag Springer, S. 348.
- [18] HS Anhalt [Hrsg.]: Vorgaben zur Abfassung wissenschaftlicher Arbeiten, Stand Februar 2012, S. 2ff..
- [19] Niemann, G., Winter, H. [Hrsg.]: Maschinenelemente: Schraubenrad-, Kegelrad-, schnecken-, Ketten-, Riemen-, Reibradgetriebe, Kupplungen, Bremsen, Freiläufe, 2. Aufl., Band 3, Verlag Springer, 2004.
- [20] MALI Spezialfahrzeuge GmbH [Hrsg.]: Technische Zeichnungen; Kommunalfahrzeug/ Geräteträger: MALI trac. 1. Aufl., Technische Kommunikation, 2011.

## **Weiterführende Literatur**

Reif, K. [Hrsg.]: Bremsen und Bremsregelsysteme, 1. Aufl., Verlag Springer, 2010.

Gerl, B. [Hrsg.]: Innovative Automobilantriebe, 1. Aufl., Verlag „mi“ moderne Industrie, 2002.

Reif, K. [Hrsg.]: Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe, 1. Aufl., Verlag Vieweg & Teubner, 2010.

qucosa [Hrsg.]: qucosa.de: Modellierung und Simulation des Systemverhaltens nasslaufender Lamellenkupplungen, 2010

[http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/7709/Dissertation\\_Rao.pdf](http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/7709/Dissertation_Rao.pdf).

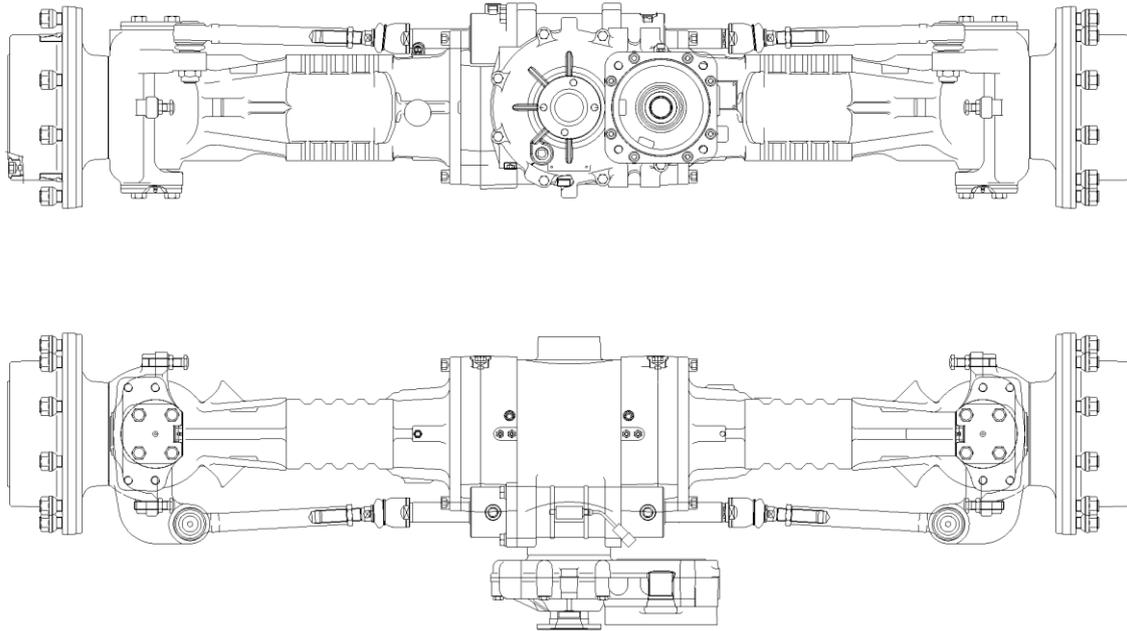
Universität Hohenheim [Hrsg.]: uni-hohenheim.de: Der 30 kW-Forschungstraktor der TU München, 1990

<http://440ejournals.uni-hohenheim.de/index.php/Grundlagen/article/viewFile/97/55>.

## **Anlagen**

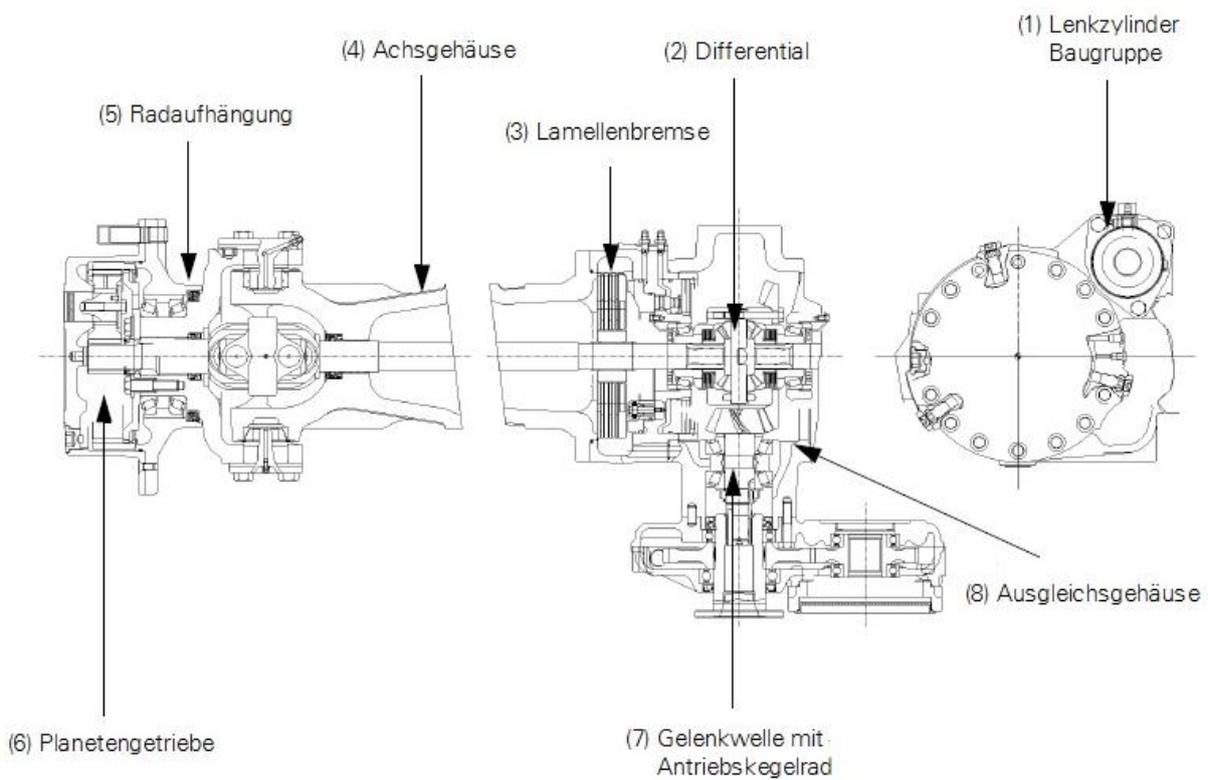
### **Anlagenverzeichnis**

Anlage 1: Hinterachse Systrac140 .....	44
Anlage 2: Schnittdarstellung der Hinterachse des SysTrac140.....	44
Anlage 3: Nicht schaltbare Kupplungen .....	45
Anlage 4: Schaltbare Kupplungen .....	45
Anlage 5: Reibscheibe SysTrac140.....	46
Anlage 6: Ausprägungen der Reibscheiben.....	46
Anlage 7: Explosionszeichnung Lamellenbremse .....	47
Anlage 8: Schnittdarstellung Sinus-Lamellenbremse .....	47
Anlage 9: Einstellschraube mit Distanzscheibe .....	48

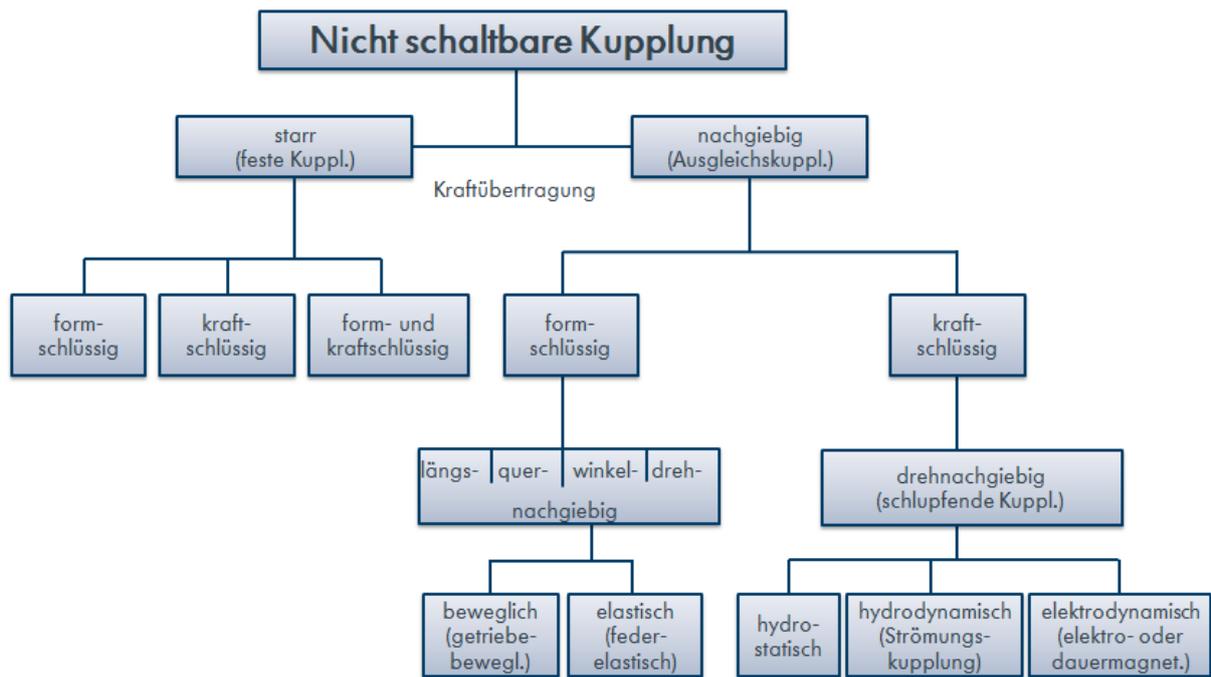


CAab11137

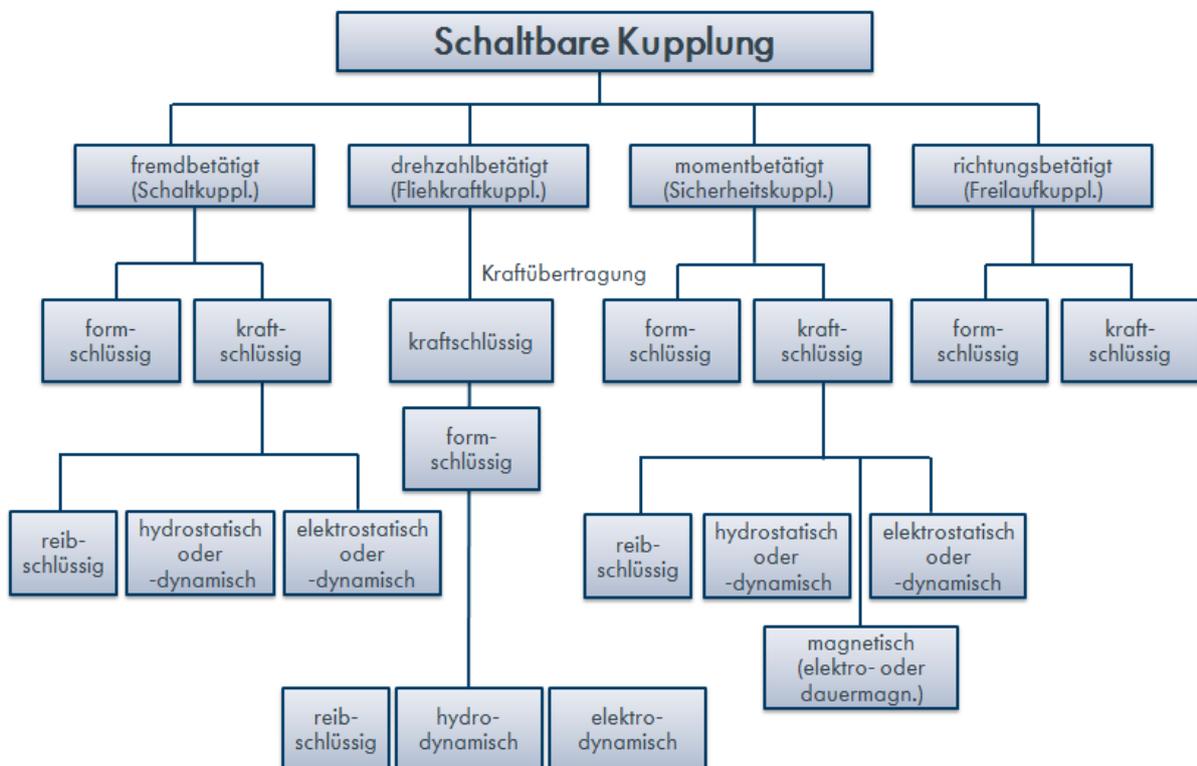
**Anlage 1: Hinterachse Systrac140 [5; S. 95]**



**Anlage 2: Schnittdarstellung der Hinterachse des SysTrac140 [5; S. 95]**



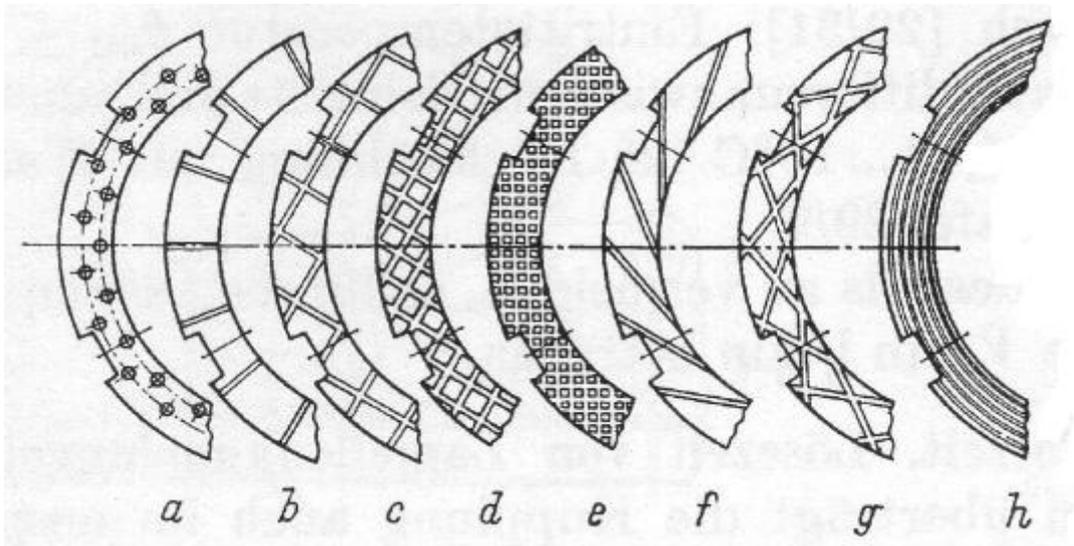
Anlage 3: Nicht schaltbare Kupplungen [Vgl.: 9; S. 412]



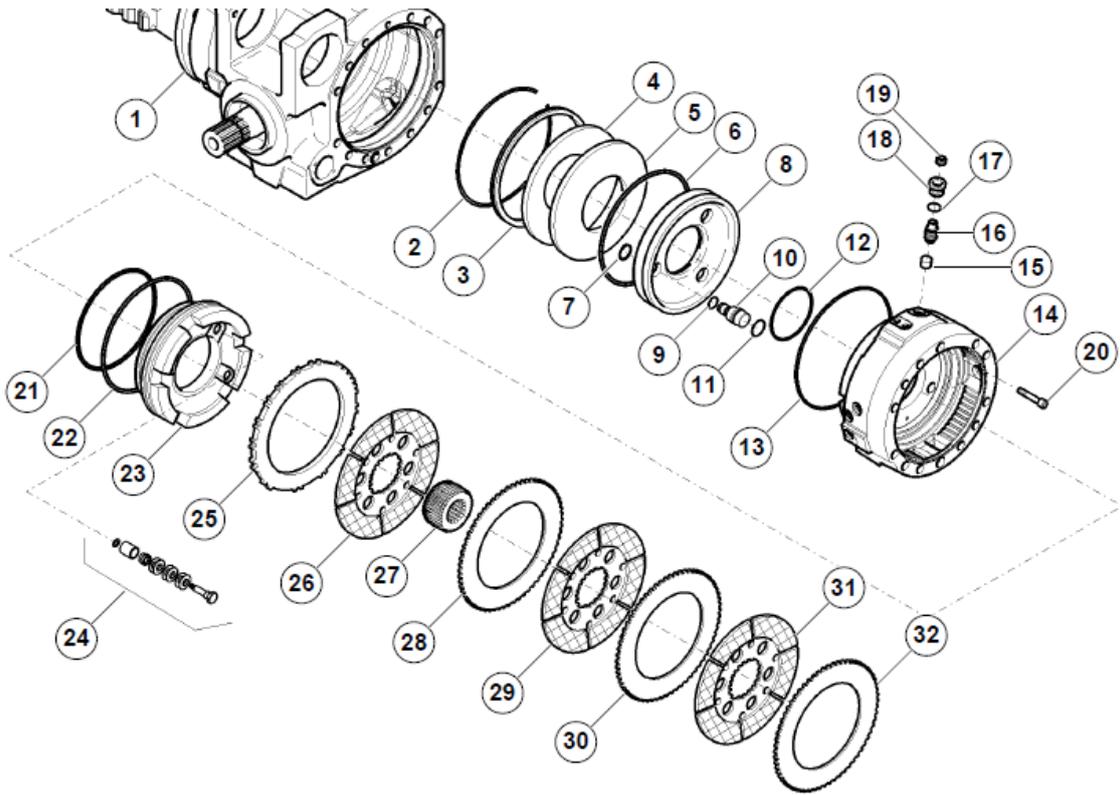
Anlage 4: Schaltbare Kupplungen [Vgl.: 9; S. 412]



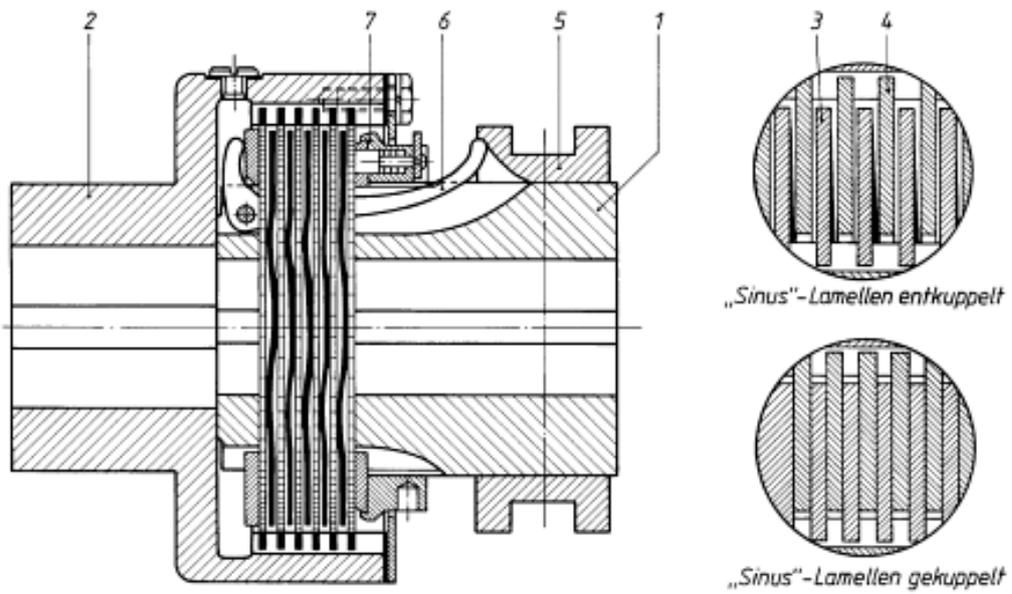
Anlage 5: Reibscheibe SysTrac140



Anlage 6: Ausprägungen der Reibscheiben [19; S. 237]



Anlage 7: Explosionszeichnung Lamellenbremse [5; S. 112]



Anlage 8: Schnittdarstellung Sinus-Lamellenbremse [9; S. 439]



**Anlage 9: Einstellschraube mit Distanzscheibe**