

## Alternative Beschichtungsstoffe für Gleitstuhlplatten

Untersuchung und Bewertung für die Bereiche Zungenvorrichtungs- und Herzstückbau

-Bachelorarbeit-

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Engineering (B. Eng.)

eingereicht an der

**Technische Hochschule Brandenburg**

**University of Applied Sciences**

Fachbereich Technik

Studiengang Maschinenbau

von Sören Nischan

Matrikelnummer 20211225

Brandenburg, den 05.07.2023

Erstgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Peter M. Flassig

Zweitgutachter:

Dipl.-Ing. (FH) Mario Marx

M. Eng. SFI Oliver Doil

Unternehmen:

voestalpine TTG GmbH

## Sperrvermerk

Die vorliegende Arbeit „Alternative Beschichtungsstoffe für Gleitstuhlplatten“ enthält vertrauliche Daten und Information der voestalpine Turnout Technology Germany GmbH und ist für jegliche Art der Veröffentlichung, Vervielfältigung oder Weitergabe an Dritte gesperrt.

Gesamthafte oder nur auszugsweise Veröffentlichungen oder Vervielfältigungen der Bachelorarbeit sind ohne ausdrückliche Genehmigung der voestalpine Turnout Technology Germany GmbH nicht gestattet. Die Arbeit darf nur den Gutachtern sowie den Mitgliedern des Prüfungsausschusses zugänglich gemacht werden.

09.10.2023

-----  
Datum

-----  
Unterschrift

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit „Alternative Beschichtungsstoffe für Gleitstuhlplatten“ selbstständig angefertigt habe. Alle genutzten Hilfsmittel oder Quellen sind kenntlich gemacht und nur diese wurden beim Erstellen dieser Arbeit verwendet. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

09.10.2023

-----  
Datum

-----  
Unterschrift

# Inhalt

Sperrvermerk .....	I
Eidesstattliche Erklärung .....	II
Inhalt .....	III
Abkürzungen .....	V
1 Einleitung .....	1
1.1 Unternehmensvorstellung .....	2
1.2 Problembeschreibung .....	3
1.3 Zielsetzung .....	3
2 Grundlagen der Weichentechnik .....	4
2.1 Aufbau einer Weiche .....	4
2.2 Die Gleitstützpunkte .....	6
2.2.1 Monolithische Ausführung von Zungengleitstühlen .....	6
2.2.2 Zweiteilige Zungengleitstühle .....	7
2.2.3 Herzstückgleitplatte.....	8
2.2.4 Zweiteilige Herzstückgleitplatte .....	9
2.2.5 Rollenunterstützte Gleitstützpunkte .....	10
3 Stand der Technik .....	11
3.1 Benetzende, temporär wirkende Schmierstoffe.....	11
3.2 Beschichtungen .....	13
3.2.1 Gleitlacke .....	13
3.2.2 Thermische Beschichtung .....	13
3.2.3 Gas- oder Dampfabscheidung .....	14
3.2.4 Sonstige Verfahren.....	14
3.3 Zusammengefügte Gleitelemente .....	15
3.4 Rollensysteme .....	15
4 Aufnahmen Ist-Zustand .....	17
5 Herstellkostenanalyse .....	20
5.1 Analyse der Herstellkosten .....	21
5.2 Analyse der Prozessschritte .....	23

5.3	Reduzierung der Herstellkosten .....	24
6	Werkstofffindung und HSEE-Bewertung .....	26
6.1	Bestimmung der Prioritätsverteilung .....	26
6.2	Granta Edupack (CES) Analyse .....	28
6.2.1	Erste Werkstoffeingrenzung .....	28
6.2.2	Zweite Werkstoffeingrenzung .....	28
6.2.3	Dritte Werkstoffeingrenzung .....	29
6.3	Anwendung der aus CES gewonnenen Erkenntnisse .....	30
6.4	HSEE-Bewertung.....	35
6.5	Berechnung der maximal zulässigen Fertigungskosten .....	36
6.6	Aufbringung des Beschichtungsmaterials .....	37
6.7	Werkstoffbewertung Klübertop TP 47-391 gegen AlSi11.....	38
7	Prüfplan.....	39
7.1	Temperaturschwankungen.....	40
7.2	Widerstand gegen Korrosion .....	40
7.3	Gitterschnittverfahren .....	40
7.4	Haftzugversuch .....	41
7.5	Künstliche Alterung unter Ultravioletter Strahlung .....	41
7.6	Zwei-Komponenten-Gleitverschleiß .....	41
7.7	Drei-Komponenten-Abrasivverschleißtest .....	41
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	42
9	Literatur .....	VI
10	Anhang .....	XI

## Abkürzungen

DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Normen
ISO	Internationale Organisation für Normung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
BWG	Butzbacher Weichenbau Gesellschaft
TTG	Turnout Technology Germany
va	voestalpine
THB	Technische Hochschule Brandenburg
SAP	Systemanalyse Programmentwicklung
EU	Europäische Union
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
F&E	Forschung und Entwicklung
DB	Deutsche Bahn
AG	Aktiengesellschaft
min.	minimale
Mrd.	Milliarden
Mio.	Millionen
uä	und ähnliche
tkm	Tonnenkilometer
RAMS	Reliability, Availability, Maintenance and Safety
LCC	Life Cycle Costs
CES	Cambridge Engineering Selector
Zg	Zeichnung
ERL	elastische Rippenplattenlagerung
PTFE	Polytetrafluorethylen
UV-Strahlung	Ultraviolette Strahlung
HSEE	Health, Safety, Environment & Energy
EHfb	Einfaches Herzstück federnd beweglich

ZVR	Zungenvorrichtung
HRS	Heben, Rollen und Sichern/Senken

## 1 Einleitung

Im Jahr 2021 betrug die Tonnenkilometerleistung der Deutschen Bahn (DB) 129,9 Mrd. tkm. Seit dem Jahr 2006 ist dies ein sehr geringer Anstieg, man kann hier fast von einer Stagnation sprechen. Da stellt sich die Frage: Soll das so sein?[1] Laut dem 2019 in der EU beschlossenen „Green deal“: nein! Hier kommt das Hochleistungsnetz der DB zum Tragen. Schon jetzt werden auf ca. 3500 km (~10 % des Gesamtnetzes) von 25 % aller Züge befahren. Die durchschnittliche Auslastung liegt hier bei 125 %. Daher soll das Hochleistungsnetz auf über 9000 km erweitert und damit mehr als verdoppelt werden. [2] Ebenso erfreut sich die Bahn seit dem Jahr 2005 einer tendenziell steigenden Fahrgastzahl, dargestellt in Abbildung 1. Ebenfalls ist mit einer baldigen Erholung des Nutzerzahleneinbruchs in den Jahren 2020 bis 2022 zu rechnen. [3] Dies hängt mit dem steigenden Nachhaltigkeitsbewusstsein in der Bevölkerung [4] und politisch gesetzten Motivationen zusammen. Bereits im Jahr 2030 wird damit gerechnet, dass es über 200 Mio. Passagiere im Fernverkehr gibt. [3]

Bewerkstelligt wird diese logistische Herausforderung mit allein in Deutschland 64.738 Weichen bzw. Kreuzungen und einer Betriebslänge Bahn von 33297 km. Für die Erhaltung der Eisenbahninfrastruktur wurden im Jahr 2022 ca. 10.89 Mrd. Euro ausgegeben. Davon waren rund 7,94 Mrd. Euro Ersatzbeschaffungen. Die Instandhaltungskosten sowie die Kosten für Ersatzbeschaffungen sind seit dem Jahr 2015 konstant angestiegen. Dieser Trend verdeutlicht, wie wichtig eine wartungsarme und standfeste Lösung sowohl zum jetzigen Zeitpunkt als auch zukünftig ist. [5]

Einen wichtigen Beitrag leistet die voestalpine Railway Systems. Diese vertreibt global Bahninfrastruktur-Komplettlösungen und ist in diesem Bereich Weltmarktführer. Damit die voestalpine Railway Systems auch weiterhin die fortschrittlichsten Produkte anbieten kann, wird kontinuierlich nach den RAMS- und LCC-Aspekten optimiert. Ein großes Verbesserungspotenzial bieten dabei die Gleitstühle und Gleitplatten. Darin besitzt die Gleitbeschichtung das größte Verbesserungspotential, welches in dieser Arbeit dargestellt wird. [6]

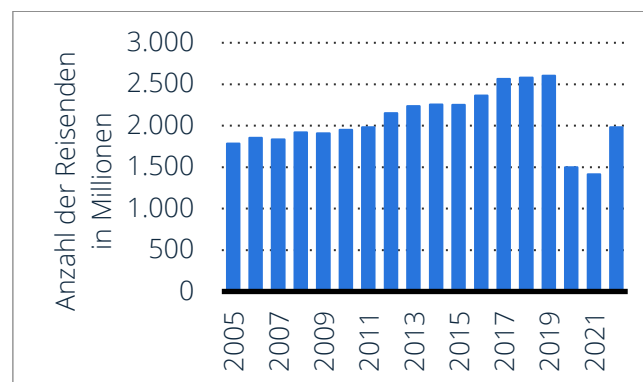


Abbildung 1: Anzahl der Bahnreisenden in den Jahren 2005-2021 [3]

## 1.1 Unternehmensvorstellung

Die voestalpine AG ist in ihren Ursprüngen ein österreichischer Stahlkonzern. Der Stammsitz der voestalpine AG ist im österreichischen Linz. Heutzutage ist die voestalpine mit rund 500 Konzerngesellschaften in mehr als 50 Ländern ein weltweit führender Technologiekonzern, der auch Werkstoff- und Verarbeitungskompetenz besitzt. Sie ist Vorreiter bei der klimaneutralen Stahlproduktion in den Standorten Donawitz und Linz durch die Errichtung von Elektrolichtbogenöfen. Seit 1995 ist die voestalpine AG an der Wiener Börse notiert. Die voestalpine ist unterteilt in 4 Divisionen. Dazu zählen die Steel-, High Performance Metals-, Metal Engineering- und Metal Forming Division. Insgesamt sind weltweit 51200 Mitarbeiter für die voestalpine AG beschäftigt [7]

Die voestalpine Railway Systems GmbH ist ein weltweit führender Anbieter von Systemlösungen für die Bahninfrastruktur. Dazu gehören nicht nur Weichen, sondern auch Schienen, Befestigungstechnik, Signaltechnik, aber auch Dienstleistungen. Sie wird als ein Geschäftsfeld zur Metal Engineering Division der voestalpine AG gezählt. Mit rund 14 % des für die voestalpine AG arbeitenden Personals nimmt die voestalpine Railway GmbH einen sehr hohen Stellenwert ein. Die Metal Engineering Division besteht aus 5 verschiedenen Geschäftsfeldern, unter anderem auch voestalpine Railway Systems GmbH. [7]

Die Weichenproduktion am Standort Brandenburg - Kirchmöser hat ihren Ursprung im Jahr 1920 und wurde von der Deutschen Reichsbahn betrieben. Im Jahr 1991 wurden 61 % des Weichenwerkes in Brandenburg von der Butzbacher Weichenbaugesellschaft (BWG) aufgekauft. Somit setzte sich die BWG aus den Standorten Butzbach, Gotha und Brandenburg zusammen. Die übrigen 35 % konnten im Jahr 1998 von der Deutschen Bahn (DB) erworben werden. Zusammen mit einem bulgarischen Weichenhersteller wurde die BWG 2003 in die voestalpine AG integriert. Heute ist der Standort Brandenburg, dargestellt in Abbildung 2, Teil der voestalpine Turnout Technology Germany GmbH (vaTTG GmbH), welche der 2012 gegründeten Metal Engineering Division angehört. [8]



Abbildung 2: Luftaufnahme Standort Brandenburg [9]

## 1.2 Problembeschreibung

Die Auswahl geeigneter Gleitbeschichtungsstoffe spielt eine entscheidende Rolle für die Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Gleitstühlen, somit wirkt sich eine dahingehende Optimierung positiv auf die Verfügbarkeit der gesamten Weiche aus. Angesichts der steigenden Anforderungen an Leistungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit ist es von großer Bedeutung, Werkstoffe zu identifizieren, die optimale tribologische Eigenschaften aufweisen. Ein ebenfalls wichtiger Aspekt ist es, die Konkurrenzfähigkeit der Produkte weiter zu erhöhen. Dafür werden Optimierungen an der wirtschaftlichen Produzierbarkeit benötigt. [10]

Bei dem momentan angewandten thermischen Spritzverfahren kann Mikroporosität entstehen, wodurch die Beschichtung zu Unterrostung neigt. Verhindert wird dies mit Hilfe einer Wachsschicht, die die Poren der Beschichtung versiegelt [11]. Bisherige Verschleißuntersuchungen haben gezeigt, dass die aufgetragene Wachsschicht maßgeblich am gewünschten Verschleißverhalten der Beschichtung beteiligt ist, siehe Abbildung 3 [9]. Der hohe Kostenfaktor des derzeit verwendeten Beschichtungsstoffes bedingt, dass dieser Kompromiss auf Dauer nicht tragbar ist.

## 1.3 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, einen aktuellen Stand der Technik hinsichtlich Gleitbeschichtungsstoffe zu erarbeiten und die aktuell verwendeten Werkstoffe anhand vorgegebener Kennwerte zu bewerten. Dafür steht ein vom Auftraggeber erstelltes Lastenheft zur Verfügung. Auf Basis dieser Bewertung sollen alternative Beschichtungsstoffe vorgeschlagen werden, die potenziell verbesserte tribologische Eigenschaften aufweisen. Dabei sollen die geometrischen Abmaße der verwendeten Schienenbefestigungssysteme beibehalten werden. Der Auftraggeber fordert, dass die Herstellungskosten der neuen Beschichtung um 10 % gegenüber dem Ist-Zustand gesenkt werden sollen. Die Kosten der bevorzugten Lösung sollen mittels eines wirtschaftlichen Vergleiches anhand der Standardgeometrien ZVR 60-500-1:12 und dem EH 60-1200-1:18 fb evaluiert werden. Anschließend sollen geeignete Beschichtungsverfahren recherchiert und mit dem aktuellen Ist-Zustand abgeglichen werden. Des Weiteren soll ein Prüfplan entwickelt werden, um die theoretisch ermittelte Stoffeignung durch praktische Versuche validieren zu können. Die hohe Vielfalt der verwendeten Schienenbefestigungssysteme bedingt, dass die Beschichtung auf allen verwendeten Varianten, die eine Gleitfläche besitzen, anwendbar sein muss. [12]

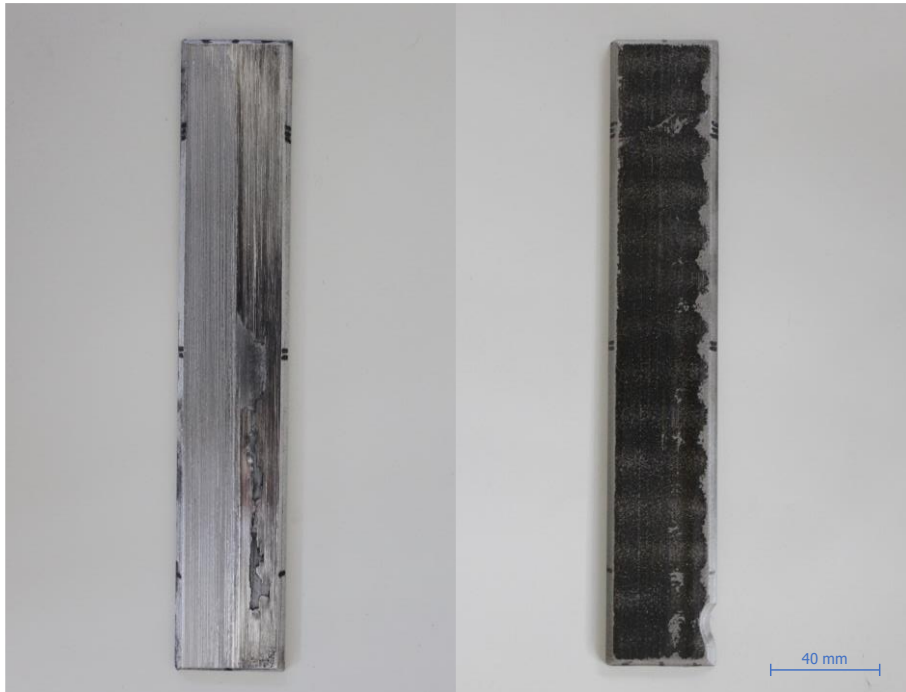


Abbildung 3: Vergleich AISi beschichteter Proben ohne Wachsversiegelung mit hohem Verschleiß (links) und mit Wachsversiegelung (rechts) nach einem Reibversuch[10]

## 2 Grundlagen der Weichentechnik

Seit dem Aufkommen erster moderner Schienensysteme gibt es die Fragestellung. Wie kann man die Spur eines Gleisfahrzeuges einfach wechseln? Bereits im Jahr 1791 gab es erste Pläne, die eine Weiche als solches Mittel beschreiben. Diese Pläne sind auf den Engländer John Curr zurückzuführen. Eine Weiche ist dabei eine Oberbaukonstruktion, die den Schienenfahrzeugen einen Übergang von einem Gleis auf ein anderes ohne Unterbrechung der Fahrt ermöglicht. Ab spätestens jedoch mit der industriellen Revolution und dem Ausbau der Gleissysteme wurde der Bedarf an Weichen unabdinglich. [13]

### 2.1 Aufbau einer Weiche

Die allgemeine Konstruktion von Weichen hat sich seit den Jahren 1927 bis 1938 nur geringfügig geändert. Dies kann auf die sehr hohe Liegezeit von Weichen, den im Grundsatz gleichbleibenden Aufbau und die Standardisierung der Vignolschienen zurückgeführt werden. Der Trend bei Weichen geht eher dahin, diese für höhere Belastungen und Frequentierungen zu optimieren. Die EW60-500-1:12 Weiche, um die es in der vorliegenden Arbeit primär gehen soll, ist eine einfache Weiche. Eine einfache Weiche besitzt ein Stammgleis und ein Zweiggleis. Das Stammgleis ist das Gleis, welches gradlinig verläuft oder den größeren Radius aufweist. Das Zweiggleis ist hingegen das Gleis, welches von dem Stammgleis abzweigt. Dargestellt ist diese Aufteilung im Fahrkantenbild Abbildung 4. [13]

Die im Bild schematisch dargestellte Zungenvorrichtung ist dabei der älteste von John Curr beschriebene Bestandteil. Die Zungenvorrichtung besteht im Wesentlichen aus zwei Backenschienen, zwei Weichenzungen, Gleitstühlen und Kleineisen (Befestigungsmaterial und Ähnliches). Die Weichenzunge stellt das bewegliche Bindeglied zwischen dem Stammgleis und den Zweiggleis dar und ermöglicht zusammen mit dem Antrieb und dem Verschluss die Umstellbarkeit der Weiche auf den jeweils gewünschten Fahrweg. Die Gleitstühle dienen sowohl als Auflager, als auch um die Beweglichkeit der Zungenschienen sicherzustellen. Ähnlich verhält es sich mit Gleitplatten in federbeweglichen Herzstücken. Wie bei Zungenschienen auch, ist dann die Blockspitze des Herzstückes beweglich auf Gleitplatten gelagert, siehe Abschnitt 2.2.4 und 2.2.5. [13]

In der Vergangenheit wurde die Beweglichkeit an den gewünschten Bauteilen der Weichen durch Fetten sichergestellt. Heutzutage ist es wartungstechnisch zu aufwändig und ökologisch nicht vertretbar, eine solche Praxis regelmäßig auszuführen. Das Fetten von Zungenschienen und federbeweglichen Herzstücken, im weiteren als bewegte Bauteile abgekürzt, wird heutzutage dennoch als Notlösung praktiziert, wenn die Verfügbarkeit der bewegten Bauteile nicht mehr gegeben ist. Das langfristige Ziel ist es daher, bewegte Bauteile, wenn möglich, durch wartungsfreie und langlebige Lösungen vor ungewünschten Effekten zu schützen. Hier wird auf so genannte Gleitbeschichtungen gesetzt. Deren Aufgabe ist es, die Bauteile vor Haftkorrosion, Abrasion und Erosion zu schützen, aber auch die Reibung reduzieren. Bei entsprechender Projektreife sollen Rollensysteme in Gänze durch Gleitbeschichtungen ersetzt werden.[14] Zum Einsatz kommen Gleitschichten immer dort, wo Relativbewegungen von wenigen Millimetern auftreten. Rollvorrichtungen können an diesen Orten nicht mehr eingesetzt werden, da diese Relativbewegungen von mehreren Centimetern benötigen. Im Falle einer Zungenvorrichtung wäre dies nach der letzten Zungenrollvorrichtung in Richtung Weichenende. [15]

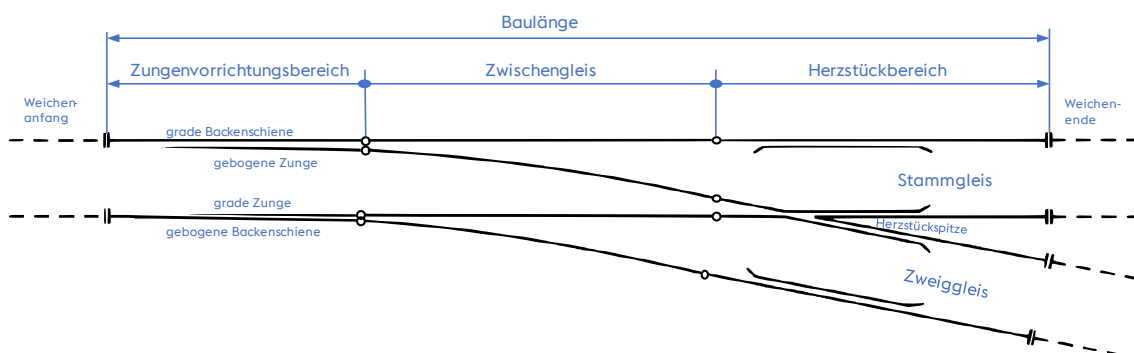


Abbildung 4: Fahrkantenbild einer einfachen Weiche mit gradlinigem Stammgleis [16]

## 2.2 Die Gleitstützpunkte

Die Gleitstützpunkte haben unterschiedliche Hauptbauformen. Der Begriff „Gleitstützpunkte“ soll in diesem Dokument dazu dienen, einen Sammelbegriff zu definieren, der für alle Schienenbefestigungssysteme, die Relativbewegungen zwischen Zungenschiene oder Herzstückspitze bezüglich Backen- und Flügelschienen zulassen, gilt. Die Wortzusammensetzung besteht aus dem am Standort geläufigen Wort „Stützpunkt“ für alle Schienenbefestigungssysteme. Das Wort „Gleiten“ bezieht sich auf die Hauptfunktion, um die es in dieser Bachelorarbeit geht. Bei der vaTTG wird in je zwei Ausführungen von Gleitstützpunkten für die Verwendung unter den Zungenschienen und federbewegliche Herzstücke unterschieden. Ebenfalls bestehen die Gleitstützpunkte aus unterschiedlichen Werkstoffen. Die in dieser Arbeit beschriebenen wesentlichen Bauformen für Gleitstützpunkte können auch durch elastisch gelagerte Rollen ergänzt werden, um die Reibung weiter zu minimieren. Dabei entstehen allerdings erhöhte Anschaffungskosten. Die Nomenklatur der Gleitstühle ist in Abbildung 5 dargestellt.

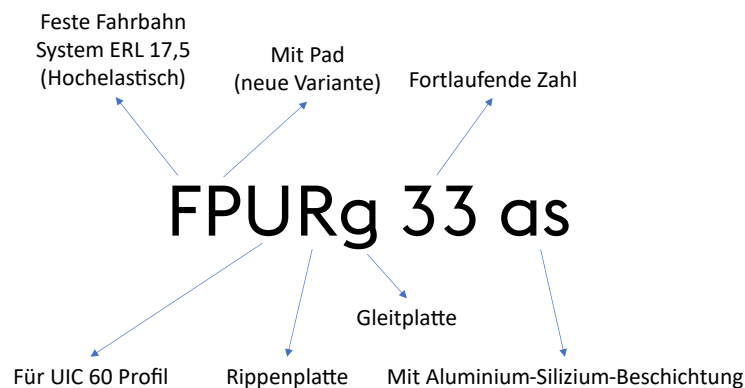


Abbildung 5: Aufschlüsselung der Nomenklatur von Gleitplatten [15]

### 2.2.1 Monolithische Ausführung von Zungengleitstühlen

Monolithisch gefertigte Zungengleitstühle sind Zukaufteile, die von verschiedenen externen Firmen angeboten werden. In diesen Gleitstützpunkten ist die Rippenplatte mit dem Gleitstuhl stoffschlüssig verbunden. Der in Abbildung 6 dargestellte URg 57 Gleitstuhl ist aus Grauguss mit Kugelgraphit gefertigt. Die Backenschienen werden in die Halterung eingelegt und auf beiden Seiten mit Federn verspannt. Die Zungenschiene wird lediglich auf die Gleitfläche aufgelegt. Diese Gleitstuhlvariante ist der Standard der Deutschen Bahn [17].

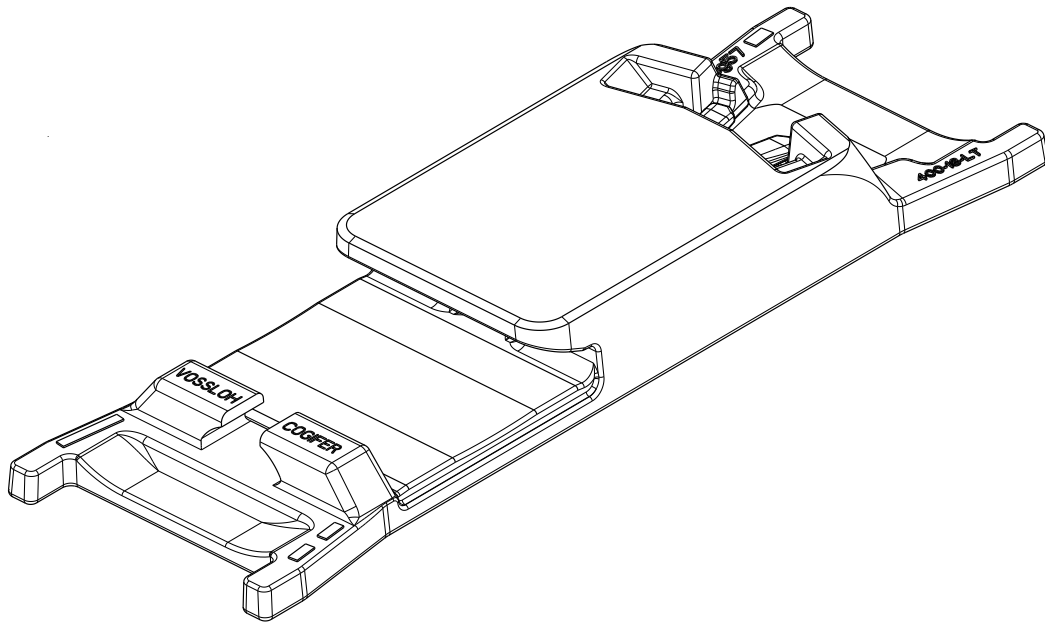


Abbildung 6: Übersichtszeichnung eines monolithisch gegossenen Gleitstuhls für Zungenvorrichtungen nach Zeichnung „low 34.0038\_02“

### 2.2.2 Zweiteilige Zungengleitstühle

Zweiteilige Gleitstühle sind eine Eigenentwicklung der vaTTG. Sie bestehen aus einer Rippenplatte und einem separaten Gleitstuhl. Die Besonderheit bei dieser Ausführung ist, dass die Rippenplatte zwei ösenförmige Lager besitzt, über die der Gleitstuhl auf der Rippenplatte befestigt wird. Eine Verspannung der Einzelteile erfolgt mit Hilfe des Federelementes, dargestellt in Abbildung 7. Die Rohteile des Gleitstuhls können sowohl aus unlegiertem Baustahl gesenkgeschmiedet werden (z.B. Zg „068.0192.9“), als auch aus Guss mit sphärischem Kugelgrafit bestehen (z.B. Zg „068.0188.9“). [15]

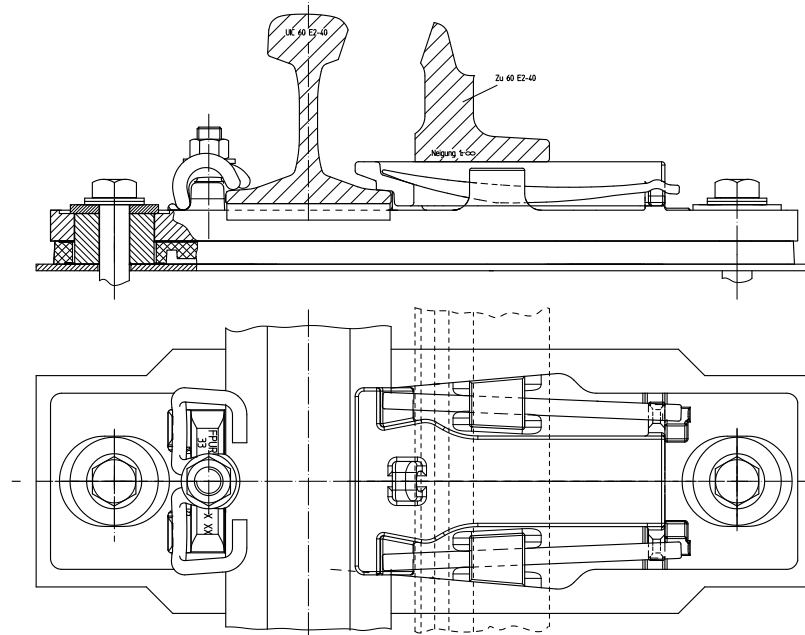


Abbildung 7: Zusammenbauzeichnung eines mehrteiligen Gleitstuhls für Zungenvorrichtungen nach Zeichnung „069.0227.9“

### 2.2.3 Herzstückgleitplatte

Diese Bauform ist der DB-Standard und wird für federndbewegliche Herzstücke in Weichen mit einer Kreisbogengeometrie verwendet [17]. Hier ist auf einer Rippenplatte die Gleitschicht direkt aufgebracht. Über die Gleitschicht verfährt im Betrieb dann die Herzstückspitze. Auf Abbildung 8 ist zu sehen, dass die Innenseiten der Flügelschienen im Arbeitsbereich der Blockspitze keinen Schienenfuß besitzen. Eine herkömmliche Verspannung der Flügelschiene, dass der Fuß beidseitig verspannt wird, ist somit nicht möglich. Daraus folgt, dass die Flügelschienen auf der Außenseite abgestützt werden müssen. Zudem wird bei dieser Variante mehr Material für die Blockspitze benötigt. Weiterhin ist bei dieser Bauform nachteilig, dass der Verschluss unterhalb des Schwerpunktes der Blockspitze angreift, sodass ein Kippmoment in der Blockspitze entsteht. Dadurch wird der Bewegungsablauf und somit auch der Gleitverschleiß negativ beeinflusst. [15]

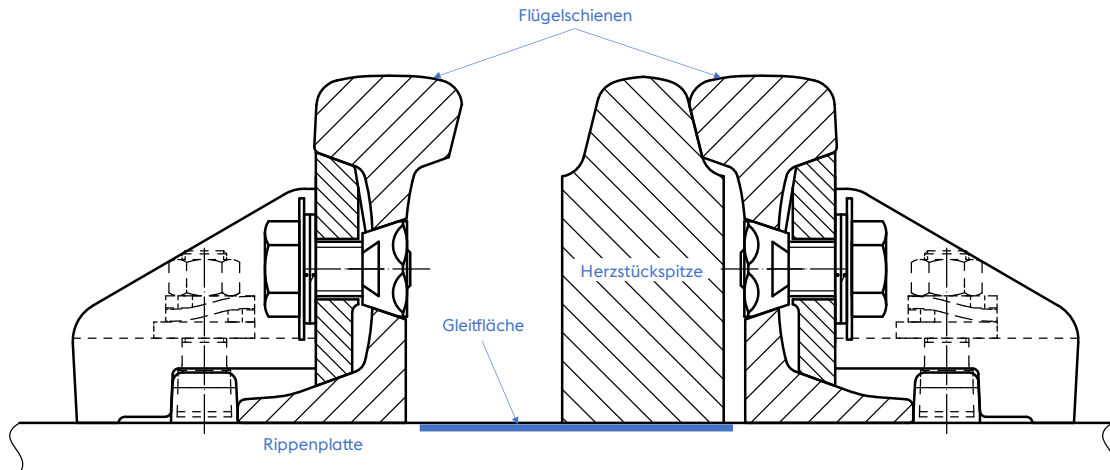


Abbildung 8: Querschnitt eines federbeweglichen Herzstückes der Regelbauart mit beschichteter Rippenplatte nach Zeichnung „low 12.1210\_1“

### 2.2.4 Zweiteilige Herzstückgleitplatte

Unter einer zweiteiligen Rippenplatte versteht man eine Rippenplatte, die durch eine abnehmbare Gleitplatte ergänzt wird. Bei dieser Bauform wird die Gleitfläche oberhalb des Schienenfußes der Flügelschiene angeordnet. Somit bleibt der Profilquerschnitt komplett erhalten und es kommt zu keiner Schwächung der Flügelschienen, dargestellt in Abbildung 9. Ebenfalls kann damit eine Fixierung des Schienenfußes auf der Innenseite des Herzstückes erreicht werden. Diese Bauform wird bei der DB zurzeit als Sonderbauform für den Hochgeschwindigkeitsbahnverkehr geführt. Weitere Vorteile gegenüber der Standardbauform sind der geringere Materialbedarf für die Blockspitze und ein geringes Kippmoment beim Umstellen, da bei dieser Bauform der Druck vom Verschluss auf den Masseschwerpunkt erfolgt. [15]

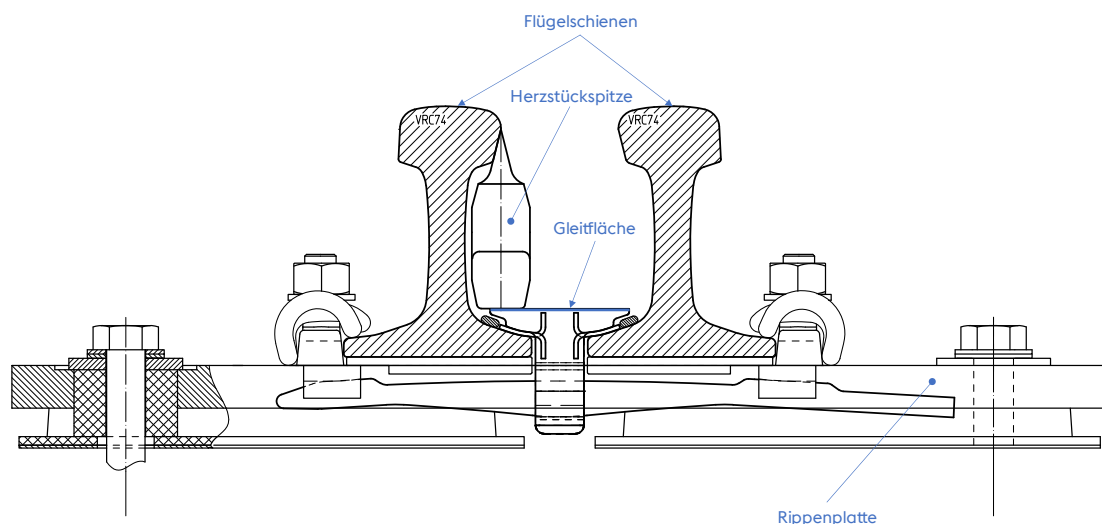


Abbildung 9: Querschnitt eines federbeweglichen Herzstückes mit innerer Backenschienenverspannung nach Zeichnung „295.0570.C-10“

### 2.2.5 Rollenunterstützte Gleitstützpunkte

Rollenunterstützte Gleitstützpunkte werden dort eingesetzt, wo geringe Umstellkräfte bei großen Relativbewegungen gewünscht sind. Dabei wird ein Gleitstuhl durch Rollensysteme erweitert. Diese bestehen aus Kunststoff oder Metall. Zusätzlich sind diese Rollensysteme durch die Verwendung von Gleitlagern in den Rollen sehr wartungsarm und benötigen keine Schmierung. Rollenunterstützte Gleitstützpunkte gibt es in vielen unterschiedlichen Ausführungen und Varianten, sowohl für Zungenvorrichtungen als auch für federbewegliche Herzstücke. Das in Abbildung 10 dargestellte Zungenrollsystem ist eine Eigenentwicklung der voestalpine und trägt den Namen vaROLL. Hier wird ein zweiteiliger Gleitstuhl durch ein Rollensystem ergänzt. Sobald die Schienenzunge durch den Antrieb über die Rollen gezogen wird, hebt sich die Zunge von den Gleitstühlen ab. Die rollenunterstützten Gleitstützpunkte sind im vorderen Bereich der Zungenvorrichtung angebracht, wo große Zungenwege zurückgelegt werden. Das Resultat ist, dass in diesem Bereich der Zungenvorrichtung die Rollreibung vorherrschend ist. [18], [19]

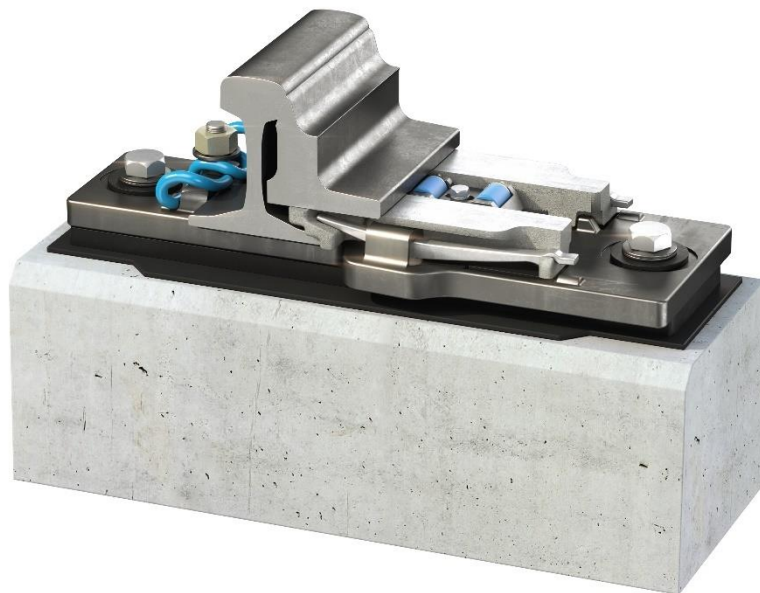


Abbildung 10: Mehrteiliger Gleitstuhl einer Zungenvorrichtung kombiniert mit einem Zungenrollsystem [19]

### 3 Stand der Technik

Im Stand der Technik wird dargestellt, wie zum jetzigen Zeitpunkt sich aneinander bewegende Gleitflächen vor Abrasion und Korrosion geschützt werden und ein geringer Reibkoeffizient ermöglicht wird. Dieses Kapitel bezieht sich auf Möglichkeiten, wie Reibung vermindert und ein Anhaften von Bauteilen verhindert werden kann.

Recherchen zu möglichen Verfahren und deren Vorteile bzw. Nachteile werden mit den Literaturrecherchertools der THB ausgeführt. Im Wesentlichen wird der Discovery Service scibo verwendet. Der Vorteil in der Verwendung von scibo liegt darin, dass viele unterschiedliche Literaturanbieter abgebildet werden. Das umfasst sowohl Fachbücher als auch Papers aus Wissenschaftsmagazinen. Der Discovery Service scibo bietet zudem die Möglichkeit, mittels boolescher Operatoren gezielt nach bestimmten Literaturtiteln zu suchen. Nachteilig wirkt sich aus, dass scibo nicht die Möglichkeit hat, direkt im Text einer gegebenen Literatur nach den Suchbegriffen zu suchen. Dadurch können neue Forschungsergebnisse, die nicht an der Überschrift oder der Literaturbeschreibung erkennbar sind, vorenthalten bleiben.

Patente werden mit Hilfe von Google Patents recherchiert. Der Vorteil davon ist, dass keine Anmeldung benötigt wird und die erhaltenen Informationen von jedermann frei einsehbar sind. Hier lassen sich sowohl die neusten Patente recherchieren als auch die Anfänge einer technischen Errungenschaft.

#### 3.1 Benetzende, temporär wirkende Schmierstoffe

Als ehemaliger Stand der Technik, ist das Auftragen einer temporär wirkenden Öl- oder Fettschicht als benetzenden Schmierstoff heute nur noch eine instandhaltungstechnische Maßnahme, die als vorübergehende Notlösung an Weichenbauteilen praktiziert wird, da sie regelmäßig erneuert werden muss [15], [20]. Ein weiterer temporär wirkender, benetzender Schmierstoff, der in Außenanlagen unvermeidlich ist, ist Wasser, welches durch Regen, Luftfeuchtigkeit oder Nebel auftreten kann [21]. Dass diese Schichten mit temporärwirkend bezeichnet werden, liegt daran, dass sie sich mit der Zeit von der Lagerfläche abstreifen und so einen Teil ihrer hydrodynamischen bzw. -statischen Eigenschaften verlieren [22]. Aus diesem Grund wurde lange Zeit auf sogenannte Dochtschmierungen mit Vorratsbehältern an den Zungenfüßen gesetzt. Diese boten eine gewisse Wartungsarmut, aber auch eine hohe Störanfälligkeit bei Regenschauern.[20] Heutzutage wird an Stellen im Gleis, an welchen nicht auf benetzende Schmierstoffe verzichtet werden kann, mit Sprühvorrichtungen gearbeitet [23].

Eine zusätzliche Beschichtung ist optional und dient der Verbesserung der Notlaufeigenschaften. Somit sind temporär wirkende Schmiermittel eine bewährte, aber auch wartungsintensive Lösung.[24] Zu den Ölen und Fetten gehören auch die Wachse [25], [26]. Welche ebenfalls die Wirkung eines Schmierstoffes entfalten können [10]. Dieses gehört aufgrund seines höheren Schmelzpunktes zu den Trockenschmierstoffen [27].

Frühe Forschungen beschreiben bereits, dass Schmierstoffe sich besser auf einer Lageroberfläche halten können, wenn diese über Taschen verfügt, in denen sich der Schmierstoff einlagern kann. Ein frühes Beispiel aus dem 19. Jahrhundert ist das Einschaben der Gleitbahnen von Werkzeugmaschinen. Primär geht es dabei um das Erzeugen einer ebenen Fläche, die eine präzise Ausrichtung zu anderen Referenzflächen besitzt. Durch das Schaben der Oberfläche entsteht ein Muster mit Hochpunkten und Tiefpunkten. Die Hochpunkte dienen dabei als Lagerpunkte, auf denen das spätere Gegenstück gleitet. In den tiefer gelegenen Stellen sammelt sich das Schmiermittel, sodass dieses nicht direkt abgestreift werden kann. Heutzutage ist es möglich, auch große Flächen hinreichend genau spanend zu bearbeiten, daher ist das Einschaben von Oberflächen ein Spezialanwendungsfall, der nur noch selten eingesetzt wird. [28], [29]

Der Trend, Lagerflächen durch spanende Fertigungsverfahren direkt mit der benötigten Planheit herzustellen, sorgt dafür, dass andere Wege zur Schmierung gefunden werden müssen. Damit derartige Flächen trotzdem durch einen Schmierstoff geschützt werden können, werden Schmiernuten oder Bohrungen in die Bauteile eingebracht. Die vielen unterschiedlichen Ausführungsformen eignen dieses Verfahren optimal für Anwendungen, bei denen hohe Lasten auftreten. [30]

Der neueste Trend ist das Einbringen von Mikrostrukturen. Derartige Strukturen können durch unterschiedlichste Fertigungsverfahren erzeugt werden. Dazu kommen noch die unterschiedlichen Formen, die die Strukturierung an sich annehmen kann. Gängige Formen sind dabei micro Schmiernuten [31], Löcher [32] und Quadrate [33]. Die Mikrostrukturen haben dabei den gleichen Verwendungszweck wie andere oberflächliche Strukturen, nämlich das Halten des Schmierstoffes an den gleitenden Flächen. Vier der gängigsten Verfahren zum Mikrostrukturieren der Oberfläche sind:

- |                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| Elektrochemisches strukturieren [34]: | Substrat wird kontrolliert durch hohen Strom Anodisch aufgelöst. Die Katode wird als Negativform ausgeführt.   |
| Microfräsen [34]:                     | Die gewünschte Form wird durch einen schnell laufenden Frässtift in die Oberfläche eingefräst. Der Durchmesser des Schaftfräasers liegt bei einem Millimeter.  |
| Laserablation [35]:                   | Durch leistungsstarke Laser wird die Struktur aus der Oberfläche heraussublimiert.   |
| Ätzen [36]:                           | Die Oberfläche wird durch eine Deckfolie oder einen Decklack geschützt. In den zu ätzenden Bereichen wird der Schutz entfernt. Nach Auftrag der Ätzlösung wird das Material im ungeschützten Bereich abgetragen. |

## 3.2 Beschichtungen

Beschichten gehört nach DIN 8580 zur fünften Hauptgruppe der Fertigungsverfahren. Dabei wird aus einer formlosen Ausgangsmasse eine fest anhaftende Schicht auf dem Substrat erzeugt. Entscheidend für das Kriterium der formlosen Masse ist der direkt vor der Aufbringung vorherrschende Zustand der Masse.[37] Schichten können im tribologischen Verhalten auf unterschiedliche Anwendungsarten hin optimiert werden. Dabei sind einlagige Beschichtungen möglich, aber auch mehrlagige Beschichtungssysteme, bei denen jede Schicht eine bestimmte Aufgabe übernimmt. Die bei Beschichtungen ohne ein benetzendes Schmiermittel vorherrschenden Kontaktarten sind der Festkörperkontakt und der Grenzkörperkontakt bzw. -schmierung ausgelöst durch Festschmierstoffe. Diese beiden Kontaktarten sind nach [22] als ein theoretisches Konstrukt zu betrachten, welches lediglich in der Hochvakuum-, Reinraum- und Raumfahrttechnologie praktisch zur Anwendung kommt. Im allgemeinen Maschinenbau muss zumindest von einer Grenzschmierung ausgegangen werden. Das bedeutet, dass sich immer eine Schicht, bestehend z.B. Handschweiß, Fett oder Feuchtigkeit, aus der Umgebungsluft auftritt. Dieser Schmierfilm ist bei ausreichendem Vorhandensein nur für sehr geringe Relativgeschwindigkeiten relevant. Bei diesem Schmierzustand treten keine hydrodynamischen oder statischen Effekte auf.[22] Über die Jahre haben sich für Beschichtungen unterschiedliche Applikationssysteme etabliert:

### 3.2.1 Gleitlacke

Bestehen in der Regel aus einer verschleißfesten organischen Matrix, in welche ein Festschmierstoff eingebettet ist [38]–[40]. Es gibt Lösungsmittelbasierte Systeme und Zweikomponentenlacke. Lacke können über herkömmliche Spritzprozesse, bei denen der Lack mittels Luftdruckes zerstäubt wird, aufgetragen werden. Für spezialisierte Anwendungsfälle stehen auch Verfahren wie das elektrostatische Spritzen und das elektrostatische Spritzen mit einer Hochrotationsglocke zur Verfügung [40], [41]. In den einfachsten Fällen kann der Auftrag auch durch Streichen und Tauchen erfolgen [39].

### 3.2.2 Thermische Beschichtung

Das Themengebiet des thermischen Spritzens ist als besonders vielfältig hervorzuheben [42], [43]. Die Ursprünge sind im Flammenspritzen zu finden [44]. Deren Weiterentwicklungen, das HVOF-spritzen und das Detonations-spritzen, sind mit dem Ziel entstanden, die Partikelgeschwindigkeit zu erhöhen. Das modernste Verfahren, welches auf dem Flammenspritzen beruht, ist das Kaltgasspritzen. Optimiert ist dieses Verfahren auf besonders hohe Partikelgeschwindigkeiten bei gleichzeitig geringen Temperaturen und sehr hohen Schichtdichten. Der daraus sichtbare Trend zu immer höheren Partikelgeschwindigkeiten ist damit zu begründen, dass die Adhäsion der Schicht auf dem Substrat steigt und die Porosität abnimmt.[42] Zu den effizientesten Verfahren gehören das Plasmaspritzen und das Lichtbogenspritzen [45]. Welche auch durch ihre gute Steuerbarkeit bestechen [42], [46]. So weit gestreut wie die Verfahren, die es gibt, sind auch die verspritzbaren Werkstoffe. Es können sowohl thermoplastische

Kunststoffe [47], als auch Metalle und deren Legierungen bis hin zu keramischen Materialien verspritzt werden [42]. Eine Besonderheit ist das sich über die pulverförmige Materialzuführung auch Kompositmaterialien verspritzen lassen [48], [49]. Aus dem letzten Punkt geht offensichtlich auch hervor, dass die Form des Ausgangswerkstoffes variieren kann. Mit der Zeit haben sich draht- und pulverförmige Zusatzwerkstoffe am weitesten etabliert. Es gibt aber auch noch die stabförmige Zuführung. [50]

### **3.2.3 Gas- oder Dampfabscheidung**

Diese Arten der Schicht weisen eine Schichtdicke von 0,1 bis 8  $\mu\text{m}$  für die physikalische Gasphasenabscheidung und 0,1 bis 50  $\mu\text{m}$  für die chemische Gasphasenabscheidung und sind damit sehr dünn auftragbar [22]. Bedingt wird das durch die gute Kontrollierbarkeit der Fertigungsparameter. Auch bei diesem Verfahren gibt es sehr viele Untergruppen, insbesondere, wie die Gasphasen erzeugt werden. Daher geht dieser Abschnitt nur auf die allgemeinen Unterschiede ein. [51], [52] Die physikalische Dampfphasenabscheidung findet in einem Vakuum statt. Darin befinden sich das Substrat und das als Festkörper vorliegende Beschichtungsmaterial. Damit das Beschichtungsmaterial in seine Dampfphase überführt werden kann, wird konzentriert Energie in dieses eingeführt. Über den Gasraum bewegen sich die Beschichtungsteilchen auf das Substrat und werden dort abgeschieden. Mit diesem Verfahren erzeugte Schichten können dabei nahezu beliebig in der Stoffzusammensetzung variieren [51].

Die thermische Gasphasenabscheidung wird über die hohen Temperaturen im Reaktor bewerkstelligt. Dabei gibt es zwei wesentliche Reaktorbauförmungen, den Heißwandreaktor und den Kaltwandreaktor. Die Namensgebung deutet schon daraufhin, dass beim Heißwandreaktor der gesamte Reaktionsraum samt Substrat aufgeheizt wird, wohingegen beim Kaltwandreaktor lediglich das Substrat aufgeheizt wird. Die üblicherweise vorherrschenden Temperaturen betragen ca. 1000°C. Beide Reaktortypen haben gemein, dass sich die Gasphase nicht nur auf dem Substrat abscheidet, sondern auch an allen anderen Stellen des Reaktors. Die daraus resultierenden Wartungszyklen zur Reinigung der Reaktoren werden anhand dieser Materialablagerungen bestimmt. Besonders stark treten diese Ablagerungen bei dem Heißwandreaktor auf. [52]

### **3.2.4 Sonstige Verfahren**

Andere Verfahren, die angewendet werden, um großflächig die tribologischen Eigenschaften von Schichten zu verbessern, sind unter anderem das Auftragsschweißen, Wirbelsintern, Galvanik und das Auftragslöten. [22] Das Auftragsschweißen ist dabei ein Verfahren, an dem heutzutage intensiv geforscht wird. Insbesondere für das Plasma- und Laserauftragsschweißen kann viel aktuelle Literatur gefunden werden [53]–[55]. Es gibt jedoch auch aktuelle Forschungen zu auftragsgeschweißten Kompositschichten, die mit einem Autogenschweißprozess erzeugt werden [56]. Wirbelsintern wurde in Bezug auf Gleitelemente bereits in der Zeit der Deutschen Demokratischen Republik zum Patent angemeldet. In dieser Patentschrift wird der Anspruch erhoben, Gleitstuhlaufsätze für Zungenvorrichtungen mit einer Schicht aus Po-

lyamid und Grafit zu beschichten. Dieses Patent ist bereits aus dem Bedarf eines wartungsfreien Gleitstuhls heraus entstanden.[20] Unter den Galvanischen Beschichtungsverfahren ist das Hartverchromen das geläufigste, jedoch ist dieses Verfahren nicht das einzige Verfahren, das an tribologisch stark beanspruchten Stellen zum Einsatz kommt [22]. In hochbelasteten Verbrennungsmotoren werden dafür galvanisch aufgebraute Nickelschichten mit eingebundenen Siliciumkarbidpartikeln verwendet [57]. Das Auftragslöten von Metallen ist, so wie das Wirbelsintern, auch ein Verfahren, welches seit einer geraumen Zeit als geeignetes Beschichtungsverfahren für Gleitstühle in Zungenvorrichtungen bekannt ist. Insbesondere Hartmessing wird dabei als geeigneter Beschichtungsstoff benannt, durch dessen Verwendung kann auf eine Öl- und Fettschmierung verzichtet werden. Zudem wird der Verschleiß an der Zungenschiene verringert. [58]

### 3.3 Zusammengefügte Gleitelemente

Bei dieser Bauform werden Einschübe, Einsätze oder Aufsätze verwendet, die mit den Gleitstützpunkten gefügt werden [37]. Es steht ein weites Spektrum an Polymeren, Metallen und Kompositen zur Verfügung, die für diesen Einsatzzweck in Frage kommen [59]. Die Möglichkeiten reichen dabei von Gleitfolien, die auf die Gleitflächen aufgeklebt werden [60] bis hin zu Blöcken aus dem gewünschten Material, die in die Gleitflächen eingesteckt werden [61]. Bei den Fügeverfahren wird zwischen lösbaren und unlösbaren Fügeverfahren unterschieden. Je nachdem für welche Art des Fügens sich entschieden wird, können unterschiedliche Anforderungen erfüllt werden. Der Austausch lösbarer Fügeverbindungen, wie das Schrauben oder das Einstecken/Einschieben, ist somit ohne Zerstörung eines oder mehrerer Bauteile theoretisch beliebig oft wiederholbar. Der Austausch eines unlösbar gefügten Bauteils, z.B. durch Schweißen oder Nieten, geht hingegen immer mit der Zerstörung von mindestens einer an der Verbindung beteiligten Komponente einher.[37] Wie bei den Beschichtungen auch, liegt der Fokus bei gefügten Gleitelementen auf der Grenzschmierung [22].

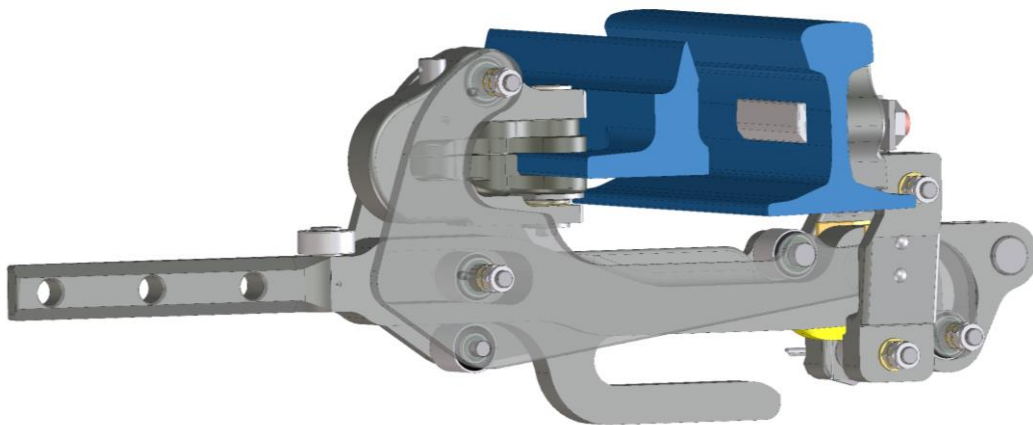
### 3.4 Rollensysteme

Die Rollreibung ist mit einer Reibungszahl von 0,001 bis 0,005 nach der Fluidodynamischen und -statischen Reibung die effizienteste Reibungsart [22]. Rollensysteme weisen eine zusätzliche mechanische Komplexität auf, die durch die Anzahl an Rollen, des dafür benötigten Kleineisens und der Lagerung zu Stande kommt [15]. Rollensysteme werden nicht auf jeder Schwelle angewendet [62]. Für eine EW60-500-1:12 Weiche mit starrem Herzstück werden vier benötigt. Der Abstand dieser Rollenvorrichtungen beträgt durchschnittlich sieben Schwellen von einer Zungenrollvorrichtung bis zur nächsten. [63]

In ihrer Betriebszustand liegen die bewegten Bauteile auf dem Gleitstuhl auf. Der Bewegungsablauf beginnt damit, dass der Stellantrieb das bewegte Bauteil über den Gleitstuhl verfährt. Dabei tritt während des Losbrechens Haft- und anschließend Gleitreibung auf. Bewegt sich das Bauteil weiter, läuft es auf die Rollensysteme auf. Dadurch wird das Bauteil vom Gleitstuhl

abgehoben. Es entsteht Rollreibung, mit deren Hilfe die Bauteile dann nahezu verschleißfrei über weite Wege mit geringerem Umstellwiderstand bewegt werden können. Die Funktionsweise bedingt, dass Rollenvorrichtungen immer dort eingesetzt werden, wo große Relativbewegungen auftreten. [15]

Die Rollenvorrichtungen werden unterteilt in Zungenrollvorrichtungen und Herzstückrollvorrichtungen. Diese beiden Bauformen werden als gleitstützpunktintegrierte Variante angeboten sowie als Variante, die zwischen den Schwellen liegt.[64], [65] Als Besonderheit sind hier die Weichenverschlüsse zu erwähnen. Verschlüsse werden an den bewegten Komponenten der Weiche eingesetzt. Allem voraus Zungenrollvorrichtungen und federbewegliche Herzstücke. Die primäre Aufgabe von Verschlüssen besteht in dem Sichern der Zungen und, wenn vorhanden, der federbeweglichen Blockspitze in einer Weiche. Zudem leitet der Verschluss die zum Überwinden der Umstellwiderstände benötigte Kraft an die bewegten Bauteile weiter. Dort haben sich unterschiedliche Bauformen etabliert.[15] Die Bauform des HRS-Verschlusses, hat sich im Hochgeschwindigkeitsbahnverkehr durchgesetzt. Das Alleinstellungsmerkmal ist, dass der HRS-Verschluss das bewegte Bauteil mit der Schiene an der es im Betriebszustand anliegt, sowohl kraft- als auch formschlüssig, verbindet [66]. Neben seinen Aufgaben als Verbindungselement wird durch den HRS-Verschluss während des Umstellvorganges eine Reduktion der auf den Gleitstuhl wirkenden Normalkraft erzielt [67]. Die verringerte Normalkraft bewirkt, dass sich auch die resultierende Reibkraft zwischen dem bewegten Bauteil und dem Gleitstützpunkt verringert [22]. Dafür ist der Bewegungsablauf rollenbasiert, dargestellt ist dies in Abbildung 11.



*Abbildung 11: Darstellung des Komplexen Verschlussmechanismus eines Weichenverschlusses mit Hebefunktion [15]*

## 4 Aufnahmen Ist-Zustand

Begonnen wird damit, dass der zurzeit vorhandene IST-Zustand der Anlagen aufgenommen wird. Dabei stehen unterschiedliche Mittel zur Verfügung. Die wesentlich angewandten Methoden sind die Literaturrecherche und Gespräche mit Mitarbeitern.

Die Literaturrecherche zu den Produkten wird vorrangig mit den im Werk zur Verfügung stehenden Mitteln durchgeführt. Dafür gibt es sowohl den Sharepoint, das BWG-Wiki, das Teamcenter/Drawing Manager, aber auch die Firmenwebseite und Abteilungsserver, für die eine Freigabe vorhanden war. Der Sharepoint ist ein Wissensspeicher, der Stück für Stück vom BWG-Wiki abgelöst wird. Zum jetzigen Zeitpunkt befinden sich im BWG-Wiki hauptsächlich Prozessbeschreibungen, Arbeitsanweisungen und Ablaufpläne. Daher hat auch der Sharepoint eine Daseinsberechtigung, wenn es an die Recherche von technischer Lektüre geht. Zeichnungen sind im Teamcenter und dem Drawing Manager zu finden. Das Teamcenter wird den Drawing Manager perspektivisch ablösen.

Informationen, die auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten basieren (z.B. Stoffdatentafeln) und somit nicht veralten, werden auch auf frei zugänglichen Webseiten recherchiert. Über die dort befindlichen Referenzen können diese anschließend über den Anbieter der Literatur (z.B. Springer Link) das Werk direkt gesichtet werden. Somit können gute Literaturen aufgefunden werden, die über scibo nicht sofort aufgefunden werden können. Der Nachteil ist, dass die dort referenzierten Literaturen oftmals nicht dem neuesten wissenschaftlichen Stand entsprechen, somit ist dieses Vorgehen mehr für das Recherchieren von stofflichen Eigenschaften geeignet.

Eine gut vorbehandelte Oberfläche ist die Grundlage, damit eine ausreichende Haftfestigkeit der Beschichtung auf dem Substrat gegeben ist. Die wichtigsten Vorbehandlungsschritte sind das Entfetten und Reinigen der Oberfläche, zudem muss die Oberfläche aufgeraut werden [68]. Am vaTTG Standort Brandenburg werden die zu beschichtenden Bauteile, aufgrund der zuvor bei der spanenden Bearbeitung angewendeten Minimalschmierung, nicht weiter entfettet. Eine ausreichende Haftfestigkeit der Beschichtung wird mit Hilfe einer rein mechanischen Oberflächenvorbehandlung gewährleistet [69]. Als Mittel zur Oberflächenvorbehandlung dient das Strahlen, welches auch in dem vorliegenden Fall Anwendung findet.

Dieses Verfahren ist ein sehr vielfältiges Oberflächenvorbehandlungsverfahren, welches Oberflächen mechanisch für eine Beschichtung aktiviert. Das bedeutet, dass eine Substratoberfläche auf die Annahme einer Beschichtung vorbereitet wird. Beim Sandstrahlen wird das Strahlgut stark beschleunigt auf die Oberfläche des Substrates geschleudert. Durch die abrasive Wirkung des Strahlgutes werden Oxidationen und andere oberflächliche Verunreinigungen abgetragen. Zurück bleibt eine Oberfläche, die metallisch rein und homogen aufgeraut ist. Das Verfahren eignet sich zur Einzelfertigung und zur Massenfertigung. Aufgrund seiner einfachen Anwendung und guten Resultaten wird das Sandstrahlen weiterhin in sehr vielen Branchen zur Oberflächenvorbehandlung eingesetzt. Als Strahlgut stehen diverse Stoffe mit jeweils unterschiedlichen Eigenschaften zur Verfügung, zum Beispiel Trockeneis-, Korund-,

Quarz-, Siliziumcarbit-, Stahl-/Gusspartikel [70]. Das Strahlgut muss scharfkantig gehalten werden, um die Oberflächen anzurauen und nicht vorzeitig zu verdichten. Wenn das Strahlgut in einem geschlossenen System Verwendung findet, sollte es regelmäßig durch ein Siebverfahren regeneriert oder anteilig durch neues Strahlgut aufgefrischt werden [68]. Bei diesem Verfahren ist wichtig zu beachten, dass die Anlage sowie alle Vorrichtungen, die damit dauerhaft in Kontakt kommen, einem erhöhten Verschleiß unterliegen, sofern diese nicht genügend geschützt sind, wie zum Beispiel durch Gummipplatten. Erklärbar ist das damit, dass der dauerhafte Strahlgutbeschuss zu einer Kaltverfestigung und damit auch zu einer Versprödung der Materialoberfläche führt. Aus diesem Grund ist auch die oben genannte Verdichtung der Substratoberfläche nicht wünschenswert [70]. Ein weiterer Nachteil des Strahlens ist die sehr hohe Staubbelastung, die durch den Materialabtrag und Strahlgutverschleiß entsteht. Bei weichen Substraten kommt es zudem zu einer Einbettung von Strahlgutpartikeln in der Oberfläche des Substrates. Diese eingebetteten Partikel können die Anhaftung der Beschichtung stark vermindern oder komplett unterbinden. Eine Reinigung des Substrates, von dem auf der Oberfläche zurückgebliebenen Strahlgut, ist in jedem Fall unverzichtbar. Erfolgen kann die Reinigung mit Hilfe eines Saugers oder entölter und getrockneter Druckluft unmittelbar vor dem Beschichtungsprozess.[68], [71]

In der Praxis werden am vaTTG-Standort Brandenburg eine Injektorhandstrahlanlage und eine Schleuderradstrahlanlage zum Strahlen von Bauteilen verwendet. Mit der Injektorhandstrahlanlage werden kleine Losgrößen bzw. große Bauteile lediglich punktuell im zu beschichtenden Bereich gestrahlt. Bei der vorhandenen Schleuderradstrahlanlage handelt es sich um eine Anlage, die zum Strahlen kompletter Bauteile konstruiert wurde. Anlagen dieser Bauart sind für große Stückzahlen mit kleiner bis mittlerer Größe geeignet [69]. Dabei soll darauf geachtet werden, dass die Oberfläche nach dem Strahlen metallisch rein ist. Die Oberfläche wird nach dem Strahlen von anhaftendem Staub befreit.[72] Anschließend sollte das Bauteil unverzüglich beschichtet werden, spätestens jedoch nach den Herstellerangaben des Beschichtungsstoffes. Eine derartige Angabe kommt daher, dass zuvor von der Umgebungsluft abgeschirmte Substrate nun ungehindert mit dem Luftsauerstoff reagieren und sich neue Verschmutzungspartikel auf der aufgerauten Oberfläche ansammeln können. In weiterer Folge kann eine merklich verminderte Haftfestigkeit der Beschichtung auftreten. [68]

Nach der Vorbehandlung der Oberfläche kann mit dem eigentlichen Beschichtungsprozess begonnen werden. Die zur Verfügung stehende Anlage ist teilautomatisiert, bestückt wird die Anlage per Hand. Der allgemeine Ablauf zum jetzigen Zeitpunkt ist, dass der Arbeiter das zu beschichtende Bauteil am Bedienstand auf den Transportschlitten auflegt. Muss das Bauteil gestrahlt werden, wird der Schlitten zur Handinjektorstrahlanlage gefahren und dort entsprechend vorbehandelt. Danach wird der Schlitten in die Beschichtungskabine gefahren, wo die Beschichtung automatisiert, aufgebracht wird. Die Maschinenaufstellung ist in Abbildung 12 dargestellt. Zum Aufbringen der thermischen Beschichtung steht in der Beschichtungskabine eine elektrische Lichtbogenspritzanlage vom Typ SmartArc® der Oerlikon Metco Group zur Verfügung. [69], [72]



Abbildung 12: Aufbau der vorhandenen Beschichtungsanlage für einzelne Bauteile

Das Lichtbogenspritzen ist ein sehr effizientes Verfahren. Es dient dem Verarbeiten metallischer und elektrisch leitender Drähte. Erzielbare Wirkungsgrade können bei 45 % liegen [45]. Beim Lichtbogenspritzen kommen immer zwei Drähte zum Einsatz, wobei einer die Anode und der andere die Kathode ist, dargestellt in Abbildung 13. Die Drähte werden ähnlich dem MIG/MAG-Schweißen in einer externen Kontrolleinheit gelagert. Das Kontrollgerät wickelt die Drähte ab und schiebt diese durch das Schlauchpaket. Zusätzlich wird der Draht vom eigentlichen Brenner durch das Schlauchpaket gezogen [73]. Durch den zwischen den Drähten erzeugten Lichtbogen schmelzen diese ab. Die Schmelze wird anschließend durch einen Gasstrom atomisiert und so auf das Substrat aufgebracht. Mögliche Zerstäubergase sind komprimierte Luft oder Stickstoff [74]. Mit diesem Verfahren hergestellte Schichten zeichnen sich durch eine sehr gute Anhaftung auf dem Substrat aus. Nachteilig, im Vergleich zu anderen Beschichtungsverfahren, ist die geringe Härte und die mitunter sehr hohe Porosität. [45]

Besonderheit des Lichtbogenspritzens ist die richtige Düsenwahl. Der Lichtbogen wird zwischen den beiden abschmelzenden Drähten erzeugt. Die Einbringung des Beschichtungstoffes in den Gasstrom variiert dabei je nach gewähltem Werkstoff. Da Beschichtungsmaterial mit einem höheren Schmelzpunkt mittiger abschmilzt als ein Werkstoff mit geringerem Schmelzpunkt, wird bei Nutzung einer Lavaldüse der fokussierte Gasstrom gestört. Daraus resultieren eine reduzierte Anhaftung und geringere Partikelgeschwindigkeit gegenüber einer zylindrischen Düse. [75]

Nach dem Beschichten wird die neu erzeugte Oberfläche mit Wachs versiegelt. Somit wird ein Unterrosten der Schicht effektiv unterbunden. Ein positiver Nebeneffekt, der durch das in den Poren festgesetzte Wachs entsteht, ist die Verbesserung der tribologischen Eigenschaften der Oberfläche.[10] Das Wachs hat somit auch eine Wirkung ähnlich einem Langzeitschmierstoff.

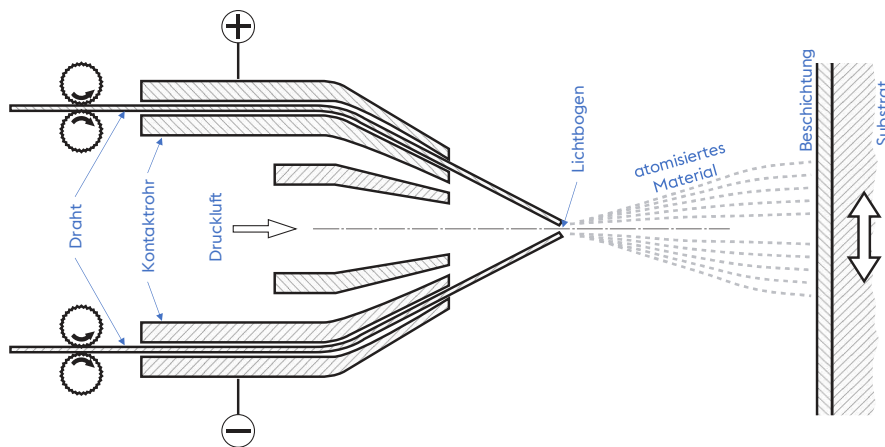


Abbildung 13: Schematischer Aufbau von einem Brenner für das Lichtbogenspritzen[73]

## 5 Herstellkostenanalyse

Das Ergebnis der Herstellkostenanalyse entscheidet über die Wege, die gegangen werden müssen, um das vom Auftraggeber avisierte Ziel einer zehnprozentigen Kostenreduzierung der Beschichtung herbeizuführen. Dafür müssen die bisher im SAP-System hinterlegten Kosten analysiert werden. Die Kosten der Beschichtung setzen sich aus drei Hauptkostenfaktoren zusammen. Die Hauptkostenfaktoren sind: die Materialkosten, die Fertigungskosten und die Sondereinzelkosten (z.B. Analysen, Konstruktionszeichnungen, uä...[76]). Die Material- und Fertigungskosten setzen sich aus den Einzelkosten und den dazugehörigen Gemeinkosten in Form eines zuvor definierten Prozentsatzes zusammen, dargestellt in Abbildung 14 [77]. In der Berechnung des Beschichtungspreises werden die Sondereinzelkosten vernachlässigt, da es hierzu keine näheren Informationen gibt [77]. Aufgeteilt werden die Herstellkosten somit in die beiden Anteile Materialkosten und Fertigungskosten. Die Kostenreduktion der beiden Anteile kann variieren, obwohl die Gesamtbilanz dennoch die zehnprozentige Kostenreduktion darstellt. Das Problem ist in der Formel:

$$\text{Fertigungskosten}_{\text{IST}} \cdot x + \text{Materialkosten}_{\text{IST}} \cdot y = \text{Herstellkosten}_{\text{IST}} \cdot 0,9 = \text{Herstellkosten}_{\text{Soll}} \quad 1$$

dargestellt. Die Unbekannten  $x$  und  $y$  sind die Variablen, die sowohl kleiner als auch größer eins sein können. Damit eine der beiden berechnet werden kann, muss die andere bekannt sein. Dies bedingt, dass zum jetzigen Zeitpunkt keine genaue Aussage getroffen werden kann, wie die Kosten anteilig gesenkt werden müssen. Damit dennoch ein Anhaltspunkt gefunden werden kann, wo das größere Einsparpotenzial besteht, werden beide Anteile einzeln betrachtet. Als ausschlaggebender Indikator wird das Verhältnis von den Sollkosten zu den IST-Kosten pro Anteil gesehen. Die Formel:

$$\frac{\text{Kosten}_{\text{Soll}}}{\text{Kosten}_{\text{Ist}}} = 0,9 \quad 2$$

Beschreibt das Verhältnis der Kosten und basiert auf Gleichung 1. Der Betrachtungsbereich der Herstellkostenanalyse ist lediglich die Gleitschicht.

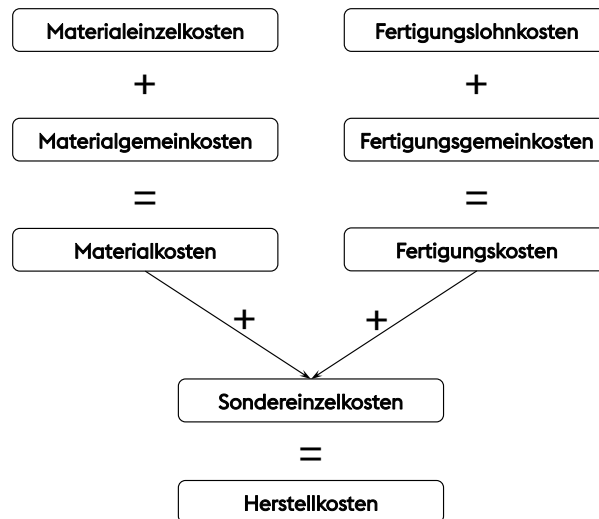


Abbildung 14: Darstellung des Kalkulationsschemas für die Herstellkostenberechnung[77]

## 5.1 Analyse der Herstellkosten

Die Analyse der Herstellkosten geschieht mit der Rechensoftware Smath. Im Kostenvergleich, dargestellt in Tabelle 1, werden die Kosten der beiden Standardgleitstühle aufgeschlüsselt. Somit kann ein Quervergleich zwischen den Beschichtungen der beiden Gleitstühle bewerkstelligt werden. Mit der Auswahl dieser beiden Gleitstützpunkte ist auch sichergestellt, dass alle zurzeit am Standort verwendeten Beschichtungsprozesse abgedeckt sind. Auffällig dabei ist, dass der URg 33 Gleitstuhl trotz kleinerer Gleitfläche einen erhöhten Beschichtungsmaterialbedarf aufweist. Erklärbar ist das damit, dass bei diesen Gleitstühlen die Kontur eine T-Form aufweist. Wenn diese Kontur im gesamten als Gleitfläche angesehen wird und der Materialverbrauch als rechteckige Fläche angenommen wird, erhält man ein näherungsweise dem SAP-Eintrag entsprechendes Ergebnis. Dieser Unterschied zwischen der realen Fläche und der angenommenen Fläche ist in Abbildung 15 dargestellt. Eine kurze Kontrollrechnung mit experimentell ermittelten Verlustfaktoren zeigt, dass der Materialverbrauch für den URg 57 Gleitstuhl realistisch erscheint. Im Falle des URg 33 Gleitstuhles ist eine Prozesstechnische Optimierung vonnöten. Beobachtungen vor Ort haben gezeigt, dass die SAP-Rechnung auf der Tatsache beruht, dass die Bauteile hochkant in dem Beschichtungskarussell eingelegt sind und der Brenner durchgehend Material auf die sich drehende Trommel sprüht, siehe Abbildung 16. Somit wird inklusive Verlustfaktor das 2,75-Fache an Beschichtungsmaterial verbraucht, als eigentlich benötigt wird. Ebenfalls ist eine kleine Abweichung bei den Kosten des Beschichtungsmaterials feststellbar. Durch diese Auffälligkeit sind geringfügige Fehler bei der Rechnung für die Kostenreduzierung möglich.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Herstellkosten der gewählten Gleitstuhlvertreter und der benötigte Kostenreduktion[78]

	URg 57		URg 33	
	Materialkosten	Fertigungskosten	Materialkosten	Fertigungskosten
<b>Einzelkosten in €</b>	3,18	32,89	4,58	17,05
<b>Gemeinkosten in €</b>	0,20	20,51	0,29	10,63
<b>Gemeinkosten in %</b>	6,43	62,38	6,43	62,38
<b>Gleichschichtfläche in cm<sup>2</sup></b>	425		241	
<b>Herstellkosten in €</b>	56,78		32,55	
<b>gesamt Kostenreduzierung in %</b>	10		10	
<b>Jeweilige prozentuale Kostenreduktion auf</b>	-67,8	89,37	33,2	88,24

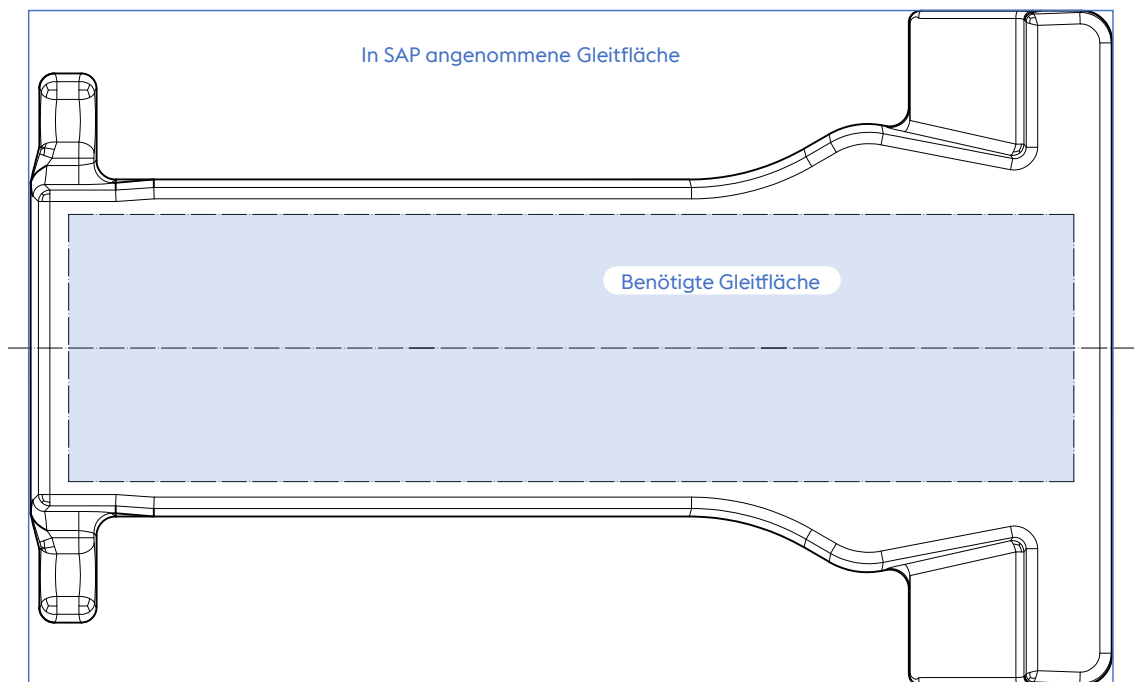


Abbildung 15: Vergleich der benötigten Fläche der Beschichtung zur angenommenen Größe der Beschichtung nach Zeichnung „068.0192.9“



Abbildung 16: Innenansicht der Beschichtungsanlage für große Losgrößen gleicher Bauteile (Karussellanlage)

## 5.2 Analyse der Prozessschritte

Aus der Analyse der Herstellkosten wird ersichtlich, dass die zehnpromtente Kostenreduktion der Beschichtung des URg 57 Gleitstuhls nicht allein durch eine neue Beschichtung bewerkstelligt werden kann. Daher müssen auch die Prozessschritte analysiert werden. Aus der Produktkostenanalyse geht hervor, dass die Fertigungskosten um elf Prozent gesenkt werden müssen. Bei dem URg 33 Gleitstuhl ist eine zehnpromtente Kostenreduzierung allein über das Beschichtungsmaterial denkbar, in der Praxis müssen dann die Kosten um gute zwei Drittel reduziert werden. Somit ist auch bei diesem Gleitstuhltyp eine verfahrenstechnische Optimierung empfehlenswert.

Damit herausgefunden werden kann, welche Produktionsschritte optimiert werden können, werden in Tabelle 2 die einzelnen Prozessschritte entsprechend dem Arbeitsplan, ergänzt mit Beobachtungen aus dem Fertigungsprozess, aufgeführt. Der mangelnden Datenlage bedingt, konnten keine Aufzeichnungen zu den Zeiten der einzelnen Prozessschritte aufgefunden werden. Lediglich der Normgesamtzeitbedarf pro gefertigten Bauteil ist bekannt.[79] Die fertiggestellte Tabelle wird anschließend manuell ausgewertet. Unterteilt wird dabei in wertschöpfende, wertneutrale und verschwendende Prozessschritte [80]. Erkennbar ist zudem, dass der

Tabelle 2: Gegenüberstellung der gleitstuhlspezifischen Prozesse mit Prozessbedeutung (grün Wertschöpfend, gelb Wertneutral, rot Verschwendend)

		Prozessbeschreibung	
		URg 57	URg 33
Prozessschritt	<b>Vorbereitende Arbeit</b>	Bauteile auf Schlitten auflegen anschließend in die Injektorstrahlanlage einfahren	Bauteile in Schleuderradstrahlanlage einlegen
	<b>Strahlen</b>	Mit Injektorhandstrahlanlage bis Sa 3 erreicht	Mit Schleuderradstrahlanlage bis Sa 3 erreicht
	<b>Gleitstützpunkte umlagern/ Nachreinigen</b>	Bauteile werden mit Druckluft gereinigt und auf dem Schlitten in die Beschichtungskabine gefahren	Bauteile werden mit Druckluft gereinigt und das Gestell in der Beschichtungskabine mit gestrahlten Teilen bestücken
	<b>Gleitstützpunkte Beschichten</b>	Beschichtungsbrenner bewegt sich vertikal und horizontal vor Bauteil	Beschichtungsbrenner bewegt sich nur vertikal, Karussell dreht sich vor Brenner
	<b>Gleitstützpunkte entnehmen</b>	Schlitten wird aus der Anlage gefahren Bauteil wird entnommen	Bauteile werden aus Karussellhalterung einzeln entnommen
	<b>Gleitstützpunkte Wachsversiegeln</b>	Das Bauteil wird auf dem Arbeitstisch abgelegt, anschließend wird das Wachs mittels Pinsel aufgebracht	Drei Bauteile werden auf dem Arbeitstisch abgelegt, anschließend wird das Wachs mittels Pinsel aufgebracht
	<b>Gleitstützpunkte verpacken</b>	Bauteil wird auf Palette gestapelt	Bauteile werden auf Palette gestapelt
	<b>Normzeitbedarf gesamt in Minuten pro Teil</b>	18,9	3,1

URg 33 Gleitstuhl eine geringere Durchlaufzeit besitzt als ein URg 57 Gleitstuhl. Zurückzuführen ist dies darauf, dass in einem Los 25 Stück URg 33 verarbeitet werden können [69]. In beiden Prozessen ist der wertschöpfende Prozessschritt das Beschichten der Bauteile. Hier gilt es den Prozess so zu optimieren, dass mehr Bauteile in der gleichen Zeit beschichtet werden können. Zu den wertneutralen Prozessschritten gehören vorbereitende Arbeiten, das Strahlen und Verpacken der Bauteile. Hier gilt es, diese Arbeiten auf das Nötigste zu reduzieren, damit mehr Zeit für Wertschöpfung besteht. Übrig bleiben die wertverschwendenden Prozesse. Darin sind alle Prozesse enthalten, durch die unnötige Kosten entstehen oder die Wertschöpfung reduziert wird.[80] Dazu zählen das Umlagern, das Nachreinigen und das Wachsversiegeln.

### 5.3 Reduzierung der Herstellkosten

Die Analyse der Herstellkosten zeigt, dass eine zehnpromtente Kostenreduzierung im Falle der URG 57 nicht allein durch die Kostenreduzierung des Beschichtungsmaterials bewerkstelligt werden kann. Damit über das Beschichtungsmaterial dieses Ziel erreicht werden kann, muss das Auftragen dieses Materials Geld einbringen. Da dies nicht möglich ist, ist lediglich eine

anteilige Kostenreduktion denkbar. Im Falle der URg 33 Gleitstühle ist die gewünschte Kostenreduzierung allein über die Schicht möglich. Der Unterschied kommt von der sich anteilmäßig stark unterscheidenden Kostenverteilung zwischen Material und Fertigungskosten. Die für eine Kostensenkung durch das Beschichtungsmaterial identifizierten Faktoren sind:

1. Die Materialkosten pro Kilogramm senken.  
Als Lösung am offensichtlichsten ist, wenn mehr Material für das gleiche Geld bezogen werden kann.
2. Die Schichtdicke senken.  
Dadurch kann sowohl Material als auch Bearbeitungszeit anteilig eingespart werden. Dies ist die effektivste Methode, um über das benötigte Beschichtungsmaterial die gesamten Herstellkosten zu senken, wirkt sich aber auch am stärksten auf die Verschleißigenschaften der Schicht aus.
3. Die Dichte senken.  
Dieser Punkt ist nicht direkt offensichtlich, beschreibt aber im Wesentlichen das Volumen der Schicht, das man pro bezahltem Kilogramm Beschichtungsmaterial erhält. Dieser Punkt ist am besten über die Wahl eines anderen Beschichtungsmaterials zu bewerkstelligen. Die Schlussfolgerung aus dieser Erkenntnis ist, Materialien nicht nach ihrem Kilopreis zu bewerten, sondern nach ihrem Preis pro Volumen.

Vielversprechender ist der Ansatz, die Fertigungskosten zu reduzieren. Dafür ist es wichtig, alle verschwendenden Prozesse so weit wie möglich zu eliminieren, die wertneutralen Prozesse zu reduzieren und die wertschöpfenden Prozesse auszubauen.[81] Das Nachbehandeln der Schicht mit Wachs ist dabei ein Prozess, der schon aus der Aufgabenstellung heraus eliminiert werden soll. [12]

Im Falle des URg 57 Gleitstuhles ist besonders auffällig, wie hoch die Verarbeitungszeit gegenüber dem URg 33 ist. Erklärbar ist dies damit, dass keine Parallelnutzung der Maschinen stattfinden kann. Bedingt wird das durch den Schlitten, der das Bauteil trägt und sich nur in einer der beiden Anlagen befinden kann. Zusätzlich sollte überprüft werden, ob das Strahlen ebenfalls vollautomatisiert geschehen kann. Ziel sollte es sein, insbesondere die Durchlaufzeit zu reduzieren.

Es wurde anhand der Herstellkostenanalyse aufgezeigt, dass der Beschichtungsprozess insbesondere bei dem URg 57 Gleitstuhl ein erhebliches Verbesserungspotenzial birgt. Ebenso kann der Beschichtungsprozess des URg 33 optimiert werden, auch wenn hier das Potenzial nicht so signifikant ausfällt. In dieser Arbeit ist das Finden eines neuen Beschichtungsmaterials nach der Aufgabenstellung der vorrangige Schwerpunkt. Die Prozessoptimierung ist ein sehr umfangreiches Thema und wird sich im Folgenden nur noch in Bezug auf die Verfahrensauswahl eines neuen möglichen Beschichtungsstoffes wiederfinden. Die detaillierte Kostenbetrachtung und Umsetzung sollen dabei als Bestandteil einer künftigen Arbeit verbleiben.

## 6 Werkstofffindung und HSEE-Bewertung

Aus den vielen möglichen Werkstoffen, die zur Konstruktion von Bauteilen zur Verfügung stehen, können nicht alle zur Beschichtung von Bauteilen verwendet werden. Die Werkstoffgruppen, in die CES untergliedert wird, sind:

- Metalle und deren Legierungen
- Kunststoffe
- Verbundwerkstoffe
- Schäume
- Funktionsmaterialien
- Biologische Materialien
- Technische Keramik
- Nichttechnische Keramik
- Glas

Aus diesen neun Materialgruppen sind insbesondere die Metalle und deren Legierungen, Kunststoffe, Verbundwerkstoffe und die technische Keramik als neues Beschichtungsmaterial vielversprechend.

### 6.1 Bestimmung der Prioritätsverteilung

Ein erster Vorversuch hat ergeben, dass nicht alle Anforderungen mit den in CES verfügbaren Werkstoffeigenschaften abgebildet werden können. Damit dennoch ein Ausgangspunkt mithilfe von CES gefunden werden kann, wird ein paarweiser Vergleich durchgeführt. Somit kann effizient gewichtet werden, in welcher Reihenfolge die Werkstoffauswahl bei dem CES-Programm eingegrenzt wird. Da die Methode des paarweisen Vergleichens auf subjektiven Einschätzungen beruht, wird eine abteilungsinterne Umfrage durchgeführt. Alle in CES ausgewählten Punkte aufzuführen, würde zu unübersichtlich werden. Daher werden Eigenschaften, die sich so nicht explizit darstellen lassen, abstrahiert mit aufgenommen. In diesem Dokument wird davon ausgegangen, dass ab fünf befragten Personen eine hinreichende Objektivität gewahrt ist und Tendenzen erkennbar werden. Die Befragung wurde in der Abteilung der Forschung und Entwicklung durchgeführt, mit der Annahme, dass die befragten Personen mit dem Befragungsthema hinreichend umfassend vertraut sind. Damit die Aussagekraft der Grafik steigt, können auch noch mehr Personen aus im Optimalfall unterschiedlichen Abteilungen befragt werden. Dadurch entsteht dann ein deutlich größeres Spektrum an Gesichtspunkten und die Subjektivität wird weiter verringert. Ebenfalls könnte auch unterhalb der einzelnen Befragten weiter zwischen den beiden Auswahlmöglichkeiten gewichtet werden.[82] In diesem Fall wird darauf explizit verzichtet, um die Befragung für die befragte Person zu beschleunigen und eine klare Stellungnahme zu erzielen.

Das Ergebnis der Befragung, dargestellt in Abbildung 17, besteht aus der Zusammenfassung der Antworten von sechs Teilnehmern. Die Auswertung deutet darauf hin, dass von der Mehrheit der Befragten die „Dauerhaft geringe Umstellkraft“ als der wichtigste Punkt angesehen wird. Da ein großes Problem der aktuell verwendeten Schicht das benötigte Wachsen der Oberfläche des Bauteils ist, ist dieses Ergebnis erwartbar. Entgegen der Erwartungshaltung, auf Grundlage des bereitgestellten Lastenheftes, fällt das Ergebnis für die Beibehaltung des bisherigen Beschichtungsprozesses mit 0,8 von 10 möglichen Punkten durchaus hoch aus. Dennoch ist insgesamt zu erkennen, dass dieser Punkt den mit Abstand geringsten Stellenwert aufweist. Dies ist damit erklärbar, dass Vorversuche zu diesem Thema gezeigt haben, dass der maßgebende Faktor, der dazu beiträgt, dass die Schicht die gewünschten tribologischen Eigenschaften aufweist, die Wachversiegelung ist [10]. Diese setzt sich in dem porösen Material fest und hat die Wirkung einer Langzeitschmierung [83]. Ebenfalls ist bemerkenswert, dass der Preis des zukünftigen Beschichtungsmaterials eine sehr untergeordnete Rolle aufzuweisen scheint. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die Mehrheit der Befragten ebenfalls eine Überarbeitung des Beschichtungsprozesses für erforderlich hält, um das Ziel einer zehnpromzentigen Kostenreduktion zu erreichen. Dieses Ergebnis ist relevant, da somit eine deutlich größere Anzahl an verwendbaren Werkstoffgruppen in CES zur Verfügung steht. Als ein ebenfalls sehr auffälliger Punkt kann festgehalten werden, dass das subjektive Empfinden der befragten Personen das Recycling des Beschichtungsmaterials als wichtiger ansieht als die CO<sub>2</sub>-Bilanz.

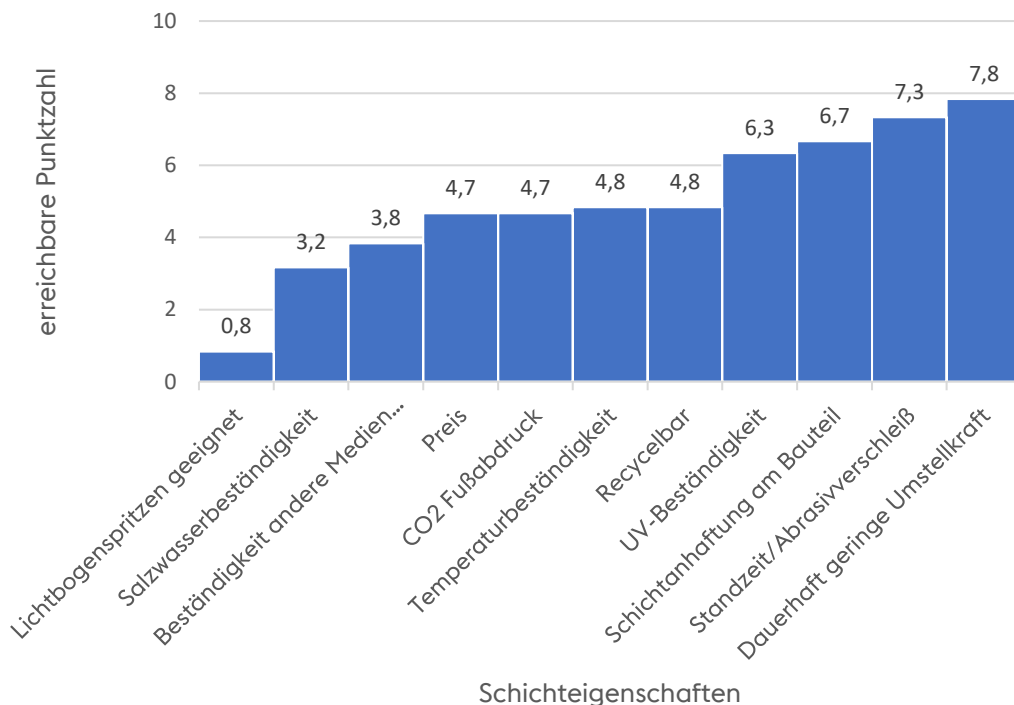


Abbildung 17: Umfrageauswertung nach der Wichtigkeit der Kriterien

## 6.2 Granta Edupack (CES) Analyse

Mit Granta Edupack, im Weiteren als CES abgekürzt, ist eine Software gemeint, die die Materialfindung bei Konstruktionsaufgaben vereinfacht. Dem Programm liegt eine umfangreiche Datenbank an Werkstoffen zugrunde. Mit Hilfe von CES ist es möglich, Werkstoffe schnell anhand benötigter Werkstoffkennwerten zu selektieren. Die Materialelektion kann anschließend in sogenannten Ashby-Diagrammen anschaulich dargestellt werden. Durch diese Vorgehensweise können auch Materialien für ein Projekt identifiziert werden, die nicht sofort ersichtlich sind. Ebenfalls lassen sich mit dem Tool Eco Audits erstellen, welche es dem Nutzer erlauben, Rückschlüsse auf die Nachhaltigkeit des zu entwickelnden Produktes zu erhalten.[59]

Auf Grundlage der zuvor bestimmten Prioritätsverteilung wird in diesem Kapitel mit der Stoffeigenschaftenauswahl in CES begonnen. Wichtig ist hierbei anzumerken, dass CES als Programm nicht auf die Auswahl von Beschichtungsstoffen optimiert ist, noch weniger auf die Auswahl von Gleitbeschichtungsstoffen. Somit sind die aus CES gewonnenen Informationen als Richtwerte anzusehen. Hierbei handelt es sich eher um eine Analyse, welche Werkstoffgruppen sich für eine zukünftige Schicht besonders gut eignen können.

### 6.2.1 Erste Werkstoffeingrenzung

In der ersten Werkstoffeingrenzung finden die offensichtlichsten Ergebnisse aus dem Paarweisen Vergleich Anwendung. Die in CES verwendete Datenbank ist die Datenbank „Level 3 Engineering“ mit ihren darin enthaltenen 4243 Werkstoffen. Die ersten markanten Informationen, wonach differenziert werden, sind die dauerhaft guten Reibwerte, eine offene Werkstoffwahl und die Anhaftung der Beschichtung an dem Bauteil. Die dauerhaft guten Reibwerte werden mit der Frischwasserbeständigkeit näherungsweise erfasst. Der zweite Punkt bezieht sich darauf, dass keine explizite Rücksicht auf Fertigungsverfahren gelegt werden muss, da nicht nur Metalle zur Auswahl stehen. Der zweite Punkt lässt sich so nicht direkt in CES darstellen, daher muss hier mit Ersatzkriterien gearbeitet werden, die gegeben sein müssen, damit die Schicht eine Chance hat, auf dem Bauteil zu halten. Die dafür benötigten Materialeigenschaften sind:

- eine Zugfestigkeit von über 50 MPa, aus dem Lastenheft entnommen
- eine Bruchzähigkeit von über  $1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$ , aus CES entnommen Referenz: Metalle
- Eine hervorragende Frischwasserbeständigkeit

Nach der ersten Stufe bleiben 2102 Materialien übrig, die die ausgewählten Eigenschaften, die die Anhaftung der Schicht beeinflussen, übrig. [59]

### 6.2.2 Zweite Werkstoffeingrenzung

Der Widerstand gegen Verschleiß lässt sich nicht umfassend in CES abbilden. Die Bewertungen für den Verschleißindex gibt es nur für Werkzeugstähle. Da dieser Begriff sehr eng gefasst ist, wird sich lediglich auf den Widerstand gegen Festfressen bezogen. Ein wichtiger Punkt, der

daraus folgt, ist die maximale Härte des Metalls. Diese darf nicht oberhalb der Härte des Schienenfußes liegen, damit der Verschleiß entsprechend dem Lastenheft nur an der Beschichtung auftritt. Die Werte, die nach dem ersten Schritt hinzugefügt wurden, sind:

- Ein akzeptabler bis exzellenter Widerstand gegen Festfressen
- Eine maximale Härte von 260 HB für R260 Schienenstahl [84]

Nach der Erweiterung bleiben 95 Metalle übrig, die in einem Plot als Abbildung 18 dargestellt werden.[59] Die markantesten Materialien wurden dabei beschriftet.

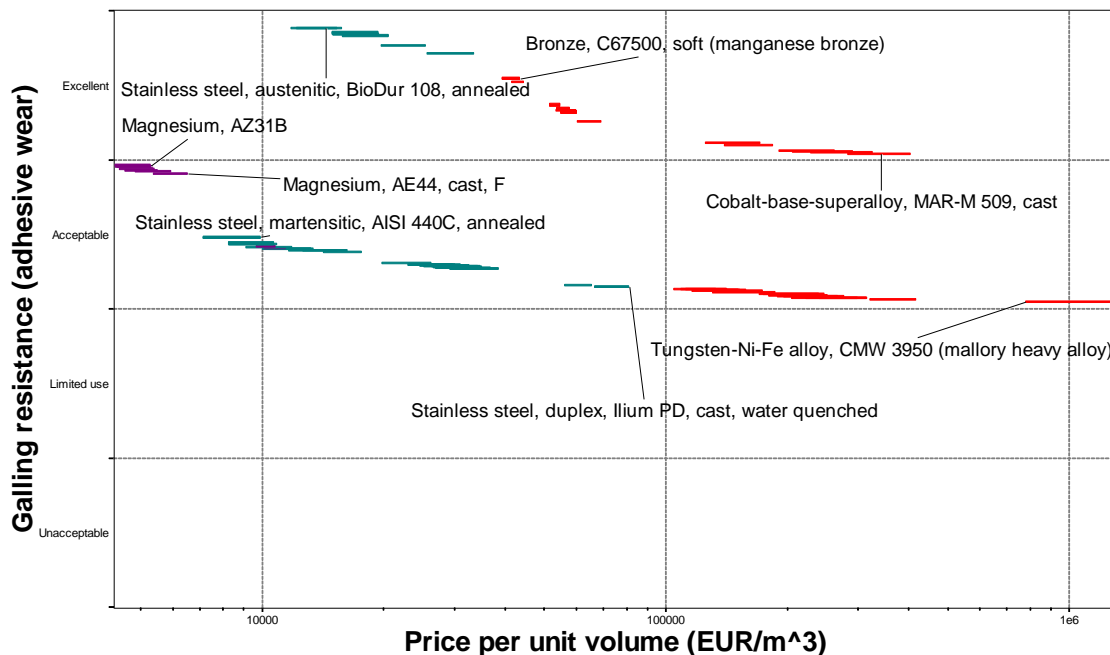


Abbildung 18: Festfresswiderstand der verfügbaren beständigen Metalle dargestellt über den Preis[59]

### 6.2.3 Dritte Werkstoffeingrenzung

In der dritten Einstellung werden die übrigen Einstellungen vorgenommen. Als erstes werden die Einstellungen aus der zweiten Werkstoffeingrenzung zurückgenommen. Somit sind auch Nichtmetalle wieder in der Auswahl mitenthalten. Anschließend werden die einstellbaren Punkte entsprechend der Prioritätsverteilung weiter eingegrenzt, bis zu dem Punkt, wo bei CES keine Einstellungen weiter möglich sind, ohne dass keine Materialien mehr gefunden werden.

- Exzellenter Widerstand gegen UV-Strahlung
- Recycling aktiviert
- CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, Primärproduktion (typische Qualität) weniger als 100 kg<sub>co2</sub>/kg
- Thermisch stabil im Temperaturbereich größer als -30°C bis +70 °C
- Salzwasserbeständigkeit akzeptable bis exzellente Beständigkeit
- Preis maximal 100000 €/m<sup>3</sup>

Nachdem die Einstellungen abgeschlossen sind, werden die Kosten pro Volumen zusammen mit dem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, im weiteren nur noch CO<sub>2</sub>-Fußabdruck genannt, geplottet. Im Plot (Abbildung 19) sind die einzelnen Materialien, für die keine genauen Vorgaben festgelegt sind, anschaulich dargestellt. Auf diese Weise ist ablesbar, wo sie sich im Verhältnis zu den anderen Materialien befindet. [59]

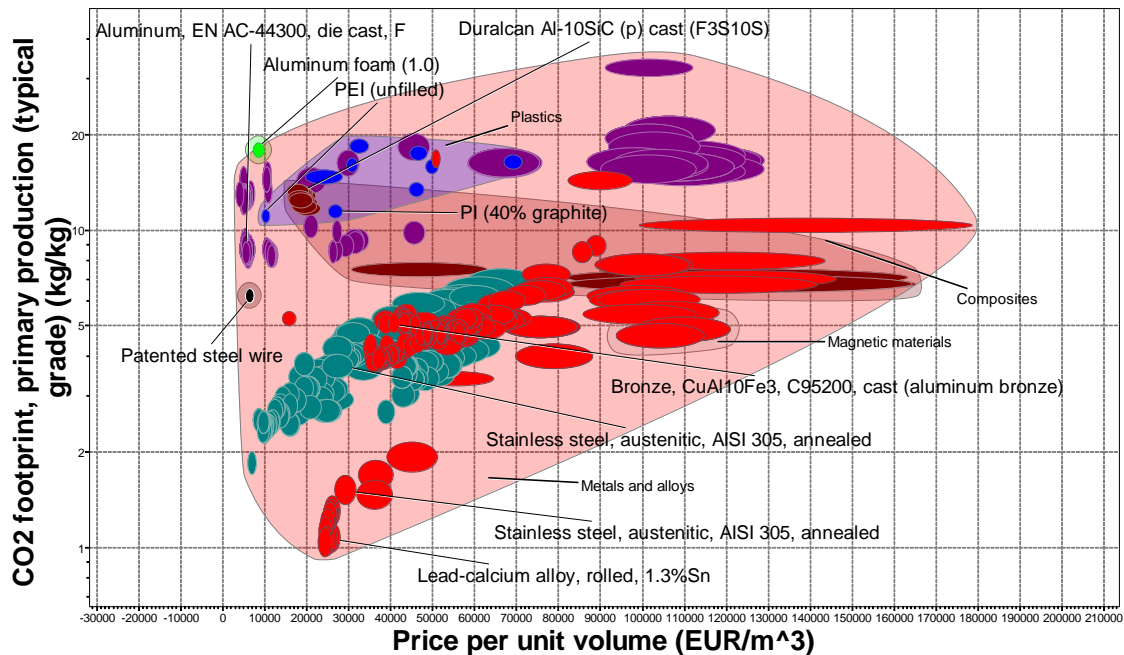


Abbildung 19: CES-Analyse mit dem Primärproduktionsfußabdruck aufgetragen über dem volumenspezifischen Preis [59]

### 6.3 Anwendung der aus CES gewonnenen Erkenntnisse

Die in Abbildung 19 dargestellten Werkstoffe sind so angeordnet, dass Rückschlüsse auf die Kosten und den entstandenen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck geschlossen werden können. Die an markanten Punkten vorliegenden Materialien sind mit ihren Namen beschriftet. Ebenfalls sind die Werkstoffgruppen dieser Materialien beschriftet. Die Forschungsfrage lautet: eine Reduzierung der Herstellungskosten um 10 % bei gleichzeitiger Beibehaltung der Schichteigenschaft [12]. Aus dem Ashby-Diagramm lässt sich entnehmen, dass die vielversprechendsten Stoffe dafür Metalle, Kunststoffe und Verbundwerkstoffe sind. Eine stichprobenartige Überprüfung des Verwendungszweckes der Werkstoffe hat gezeigt, dass häufig die Verwendung in Gleitlagern und -buchsen auftritt [59]. Somit kann geschlussfolgert werden, dass valide und übertragbare Ergebnisse zu erwarten sind. Auffällig ist, dass Bleiprodukte den geringsten Fußabdruck CO<sub>2</sub> und besonders häufig in Gleitlagern Anwendung finden. Der damit verbundene geringe Preis macht aus technischer Sicht diese Legierung zu einer idealen Alternative. Aus HSEE-Sicht wirkt sich das Blei negativ auf Organismen und insbesondere auf das Nervensystem aus. Ebenso ist es für viele Berufskrankheiten verantwortlich.[59] In der CES-Software wird

explizit vor den zu erwartenden Risiken gewarnt, daher wird dieses Material aufgrund seiner Toxizität im Weiteren keine Berücksichtigung finden.

Die als nächstes besonders auffälligen Stoffe, welche aus dem Ashby-Diagramm hervorgehen, sind rostfreie Stähle, Bronzelegierungen und Aluminiumlegierungen in der soeben beschriebenen Reihenfolge. Die in CES getätigten Einstellungen können dabei nicht das volle Funktionsspektrum einer Gleitschicht wiedergeben. Es können daraus keine konkreten Aussagen darüber getroffen werden, wie sich das Gleitverhalten, der Gleitverschleiß und die Beständigkeit gegen andere Medien in dem avisierten Nutzungszeitraum von 20 Jahren auswirken werden.

Die markierten Werkstoffe Bronze CuAl10Fe3 und Aluminium EN AC-44300 weisen die höchste Ähnlichkeit zu den bisher verwendeten Beschichtungsstoffen CuAl9Fe1 und AlSi11 in der chemischen Zusammensetzung auf. Hier ist zu erkennen, dass beide Werkstoffe einen höheren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck aufweisen als der rostfreie Stahl. Insbesondere das Aluminium weist einen mehr als doppelt so hohen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck auf. Die Bronzelegierung besticht durch ihre etwa ein Drittel höheren Kosten gegenüber dem rostfreien Stahl. Der austenitische rostfreie Stahl „AISI 305 gegläht“ wird daher an dieser Stelle als technisch am vielversprechendsten aus dieser Gruppe hervorgehoben, da er auch nach der zweiten Werkstoffeingrenzung den höchsten Widerstand gegen Fressen bei gleichzeitig dem geringsten Preis aufweist. Aus Abbildung 19 wird ersichtlich, dass dieses Material ebenfalls ein günstiges Verhältnis aus Bezugskosten zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen besitzt.[59] Basierend auf zuvor erfolgten Versuchsergebnissen ist jedoch zu erwarten, dass bei den aufgezeigten Bronze- und Aluminiumlegierungen genauso wie hochlegierte Chrom-/Chromnickelstähle nur mit dem Wachsversiegeln erreicht werden kann. [10] Daher werden diese Werkstoffgruppen ebenfalls vernachlässigt.

Eine wichtige Anmerkung ist jedoch, dass das aktuell verwendete Material eher als ein Trägermaterial für das Wachs als Langzeitschmierung anzusehen ist, daher kann auch Baustahl aufgespritzt werden und die gewünschten Eigenschaften der Korrosionsbeständigkeit über den Langzeitschmierstoff eingestellt werden. Diese Lösung ist dann materialkostentechnisch nahezu identisch mit der jetzig verwendeten Lösung und würde bei korrekt ausgeführtem Beschichtungsprozess ähnlich gute Ergebnisse liefern, wobei der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck ähnlich gering wie der von den Bleilegierungen ist. Nachteilig wären, dass das verwendete Langzeitschmiermittel auf seine Eignung zur Unterbindung von Korrosion hin geprüft werden muss und die geringfügig höhere benötigte Verdampfungsenergie im thermischen Spritzprozess. Die massenspezifische Verdampfungsenergie beträgt für das Aluminium EN AL-44300  $1,55e^4$  bis  $1,71e^4$  MJ/kg und für Baustahl  $1,71e^4$  bis  $1,89e^4$  MJ/kg [59]. Diese Möglichkeit ist nach gegebener Aufgabenstellung nicht vorgesehen, stellt jedoch eine sehr vielversprechende Alternative zu dem jetzigen Material dar und kann gegebenenfalls als Übergangslösung bis zur Etablierung des neuen Beschichtungsprozesses genutzt werden. Aufbauend auf dieser Erkenntnis kann dann auch argumentiert werden, dass die Oberfläche der Gleitstützpunkte mikrostrukturiert werden kann. Das erfolgt dann vorzugsweise durch Laserablation. Anschließend wird in

die erzeugten Hohlräume ein Langzeitschmierstoff eingelagert. Diese Möglichkeit wäre hinsichtlich Fertigungsgeschwindigkeit und Materialersparnis die effizienteste Lösung.[85] Dieser Ansatz wird nicht weiterverfolgt, da die "Beschichtung" die vom Auftraggeber geforderte Haftzugfestigkeit nicht erfüllen kann, allerdings wird die Lagerfläche ausschließlich auf Scheurung beansprucht. Somit kann darüber nachgedacht werden, wie hoch die Priorisierung dieses Merkmals ist.

Am oberen Ende des CO<sub>2</sub>-Fußabdruckes bei dennoch geringen Preisen sind Verbundwerkstoffe und Kunststoffe, von denen auffällig viele Lagerkunststoffe sind. Verbundwerkstoffe auf Basis von SiC-Partikeln in einer Aluminiumlegierung, namentlich das Al-10SiC, wurden bereits als Verschleißschutzschichten getestet. Verbundwerkstoffe können dabei auf sehr viele unterschiedliche Anwendungszwecke hin optimiert sein. Das Al-10SiC wurde hinsichtlich seiner Eignung als Beschichtungsmaterial bereits untersucht. Dabei wurde es mittels Laserauftragschweißen auf einen austenitischen rostfreien Stahl appliziert und die daraus resultierenden Eigenschaften ermittelt. Es wurde festgestellt, dass diese Beschichtung den Verschleiß und den Reibungskoeffizienten gegenüber dem Substrat senken kann. Die Beschichtung erreicht ihre verbesserten tribologischen Eigenschaften primär durch eine Erhöhung der Microhärte im Vergleich zu dem Substrat. Das applizierende Fertigungsverfahren ist dabei sehr entscheidend, da es bei ungünstig gewählten Prozessen zu einer ungenügenden Benetzung der SiC-Partikel kommen kann. Äußern können sich diese Fehlstellen durch Risse in der Oberfläche, die zu Ausbrüchen oder einer reduzierten Schichtperformance führen können. [86]

Kunststoffe werden bereits seit vielen Jahren zur Reibungsreduzierung zwischen Bauteilen eingesetzt [59]. Durch Additive wie Graphit und MoS<sub>2</sub> können die Standzeit und der Reibkoeffizient weiter verbessert werden [38]. Solche Kunststoffe auf ein Substrat aufzutragen, kann mittels thermischen Beschichtens geschehen. Verfahren, die bereits im Zusammenhang mit dem Kunststoffbeschichten von Bauteilen erforscht wurden, sind Prozesse wie das:

- Flammenspritzen
- Hochgeschwindigkeitsflammspritzen von Polymer-Beschichtungen
- Plasmaspritzen von Polymerbeschichtungen
- Kaltgasspritzen von Polymerbeschichtungen [47]

Das derzeit am vaTTG Standort Brandenburg verwendete Lichtbogenspritzen eignet sich dabei nicht zum Verspritzen von Kunststoffen. Plasmaspritzen wäre in Bezug auf die Steuerbarkeit ein vergleichbarer Prozess, jedoch ist dieses Verfahren das deutlich teurere der beiden.[42] Ein Vorteil von Kunststoffen gegenüber Kompositmaterialien ist die geringe Energie, die benötigt wird, damit der Kunststoff verarbeitet werden kann. Der beispielhafte Vergleich zeigt, dass zum Extrudieren von einem Kilogramm PI (40 % Graphit) 6,02 bis 6,65 MJ an Energie benötigt wird. Damit ein Kilogramm Al 10SiC zu gegossen werden kann, werden bereits 10,1 bis 11,2 MJ an Energie benötigt.

Mit Blick auf die Fertigungskosten wird sich aufgrund des geringeren Energiebedarfes bei der Fertigung für Kunststoffe mit gleiteigenschaftsverbessernden Additiven entschieden. Weitere Recherchen zu den Kunststoffen haben ergeben, dass sich Gleitbeschichtungslacke als anwenderfertige Lösung bereits seit Jahren in der Industrie etabliert haben. Diese bestehen durch besonders wirtschaftliche Applikationsmöglichkeiten und sind hinsichtlich ihrer tribologischen bzw. mechanischen Eigenschaften optimiert. Nachteilig wirkt sich aus, dass diese Beschichtungen nur mit erhöhtem Aufwand in Schichtdicken über 30  $\mu\text{m}$  verarbeitet werden können. Ebenfalls können die exakten Eigenschaften nicht in CES ermittelt und dargestellt werden. Somit ergibt sich ein gewisser Unsicherheitsfaktor in Bezug auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und Recyclbarkeit gegenüber den thermoplastischen Kunststoffen. [38]

Unter den Vertretern der Gleitlacke werden zwei Vertreter nach ihrer potenziellen Eignung für hochbelastete Gleitstützpunkte vorausgewählt und anschließend direkt miteinander verglichen. Der Vergleich zwischen den beiden Beschichtungstypen findet als Gegenüberstellung in der Tabelle 3 statt. Bei der Gegenüberstellung werden alle relevanten Punkte, die über einen Stoff bekannt sind, in einer Tabelle gesammelt. Woraufhin die Eigenschaften miteinander verglichen werden können. Auf dieser Grundlage kann dann eine Entscheidung getroffen werden. In die Endauswahl kamen zwei Lacke. Variante eins ist der Lack Gleitpan JF 158 A\_B der Firma Klüber, welcher ein Zweikomponentenlack ist. Variante zwei ist ein Lösungsmittel-basierter Gleitlack, der speziell auf Fortbewegungsmittel hin optimiert wurde. Durch die Gegenüberstellung wird sich für den Beschichtungsstoff Gleitpan JF 158 A\_B entschieden. Dieser besticht durch eine hohe Schichtdicke von bis zu 100  $\mu\text{m}$ . Ebenfalls wird die Standzeit, welche im paarweisen Vergleich eine hohe Wichtung findet, als sehr hoch angegeben. Zu der UV-Beständigkeit können in beiden Fällen keine genauen Angaben getroffen werden. Der Hersteller des gewählten Beschichtungsmaterials, Klüber Lubrication Deutschland GmbH & Co. KG, gibt an, dass zur UV-Beständigkeit keine Tests durchgeführt wurden. Weiterhin wird angegeben, dass auf den betrachteten Zeitraum von 20 Jahren aufgrund unvorhersehbarer Einflüsse keine seriöse Aussage zur UV-Beständigkeit getroffen werden kann. Es wird empfohlen, die Gebrauchsdauer unter Serienbedingungen zu ermitteln [87]. Ausgehend von den bekannten Eigenschaften des PTFE-Materials, welches als Langzeitschmierstoff dient, kann von einer guten UV-Beständigkeit gesprochen werden [59]. Wie sich die Kunstharzmatrix verhält, kann nicht abgeschätzt werden. Hierfür werden weiterführende Test benötigt.

Tabelle 3: Gegenüberstellung jeweils eines Vertreters für lösungsmittelbasierte Gleitlacke und zweikomponenten Gleitlacke [39], [88]

	<b>Klüber Gleitpan JF 158 A_B [88]</b>	<b>Berucoat AK 936 [39]</b>
<b>Beschichtungsart</b>	Zweikomponentiger PTFE-Gleitlack	Lufttrocknender Gleitlack mit eingebettetem PTFE
<b>Anwendungsgebiet</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automobilindustrie</li> <li>• Elektro- und Feinwerktechnik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automobilindustrie</li> <li>• Luftfahrtindustrie</li> <li>• Bahntechnik</li> </ul>
<b>Besondere Eigenschaften</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sehr hohe Verschleißfestigkeit</li> <li>• niedriger Reibwert</li> <li>• Hohe Medienbeständigkeit</li> <li>• gute Chemikalienbeständigkeit</li> <li>• guter Korrosionsschutz</li> <li>• gute Adhäsion auf Stahlunterlagen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gute Geräuschkämpfung</li> <li>• sehr gute Haftung auf verschiedensten Oberflächen</li> <li>• Keine Anhaftung von Schmutz und Staub</li> <li>• Reduzierung der Reibkraft und des Stick-Slip Effektes</li> <li>• Guter Korrosionsschutz</li> <li>• Bildet Diffusionsbarriere gegen Wasser- und Feuchteinwirkungen</li> </ul>
<b>Verarbeitung</b>	Spritzen	Spritzen, Tauchen und Streichen
<b>Schichtdicke</b>	Empfohlen 5-25 µm (bis 100 µm möglich)	Empfohlen 10-30 µm
<b>Trockenbedingungen</b>	230 °C Objekttemperatur für mindestens 15 min	Trockenzeit an der Luft: ca. 20 Minuten (abhängig von der Schichtdicke)
<b>Lagerfähigkeit</b>	12 Monate bei 20°C Topfzeit ca. 24 h bei 25°C	18 Monate bei 20°C
<b>Farbe</b>	grün	weis
<b>Gitterschnitt, DIN EN ISO 2409</b>	0 Gt	

## 6.4 HSEE-Bewertung

Die HSEE-Bewertung erfolgt anhand der Voestalpine internen Anforderungen an einen neu zu beschaffenden Gefahrstoff. Die abzuwägenden Anforderungen werden in Tabelle 4 dargestellt. Die Zusammenfassung in Tabelle 4 zeigt, dass beide Komponenten des Gleitlackes „Klüber Gleitpan JF158“ zu hohen Anteilen aus reproduktionstoxischen Bestandteilen bestehen. Dieser Umstand stellt ein Ausschlusskriterium für den Stoff dar [89]. Die Alternative ist ein vom gleichen Hersteller angebotener Gleitlack namens „Klübertop TP 47-391“ der hinsichtlich einer geringeren Gefährdung hin optimiert wurde [90]. Nachteilig ist lediglich die geringfügige Verschlechterung der Gitterschnittprüfung von Gt 0 auf Gt 1. Vorteilhaft ist, dass die Lagerfähigkeit auf 24 Monate verlängert wird, die anderen für die vorausgegangene Entscheidungsfindung entscheidenden Kriterien sind dabei identisch [40]. Der Einfluss der Gitterschnittprüfung auf die vom Auftraggeber gesetzten Anforderungen muss weiterhin ermittelt werden.

Tabelle 4: HSEE-Gegenüberstellung der Vorzugsvarianten nach Anforderungen der vaTTG

	<b>Klüber Gleitpan JF158</b>		<b>Klübertop TP 47-391</b>	
	<b>Komp. B [93]</b>	<b>Komp. A [88]</b>	<b>Komp. B [92]</b>	<b>Komp. A [91]</b>
<b>Kanzerogen</b>	Nicht anwendbar	Klasse 3: < 0,01 %	Nicht anwendbar	Klasse 2: < 0,01 %
<b>Mutagen</b>	Nicht anwendbar	Sonstige: < 0,01 %	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar
<b>Reproduktionstoxisch</b>	Sonstige: 40 %	Sonstige: 54,85 %	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar
<b>Wassergefährdungs- klasse</b>	WGK 2		WGK 1	
<b>Lagerung</b>	TRGS 510			
<b>Entsorgung</b>	Farb- und Lackabfälle, die organische Lösemittel oder andere gefährliche Stoffe enthalten			
<b>Brandbekämpfung</b>	Wassersprühnebel, alkoholbeständiger Schaum, Trockenlöschmittel oder Kohlendioxid			
<b>Benötigte PSA</b>	Augenschutz: Dicht schließende Schutzbrille		Augenschutz: Schutzbrille mit Seitenschutz	
	Handschutz Material: Fluorkautschuk Durchbruchzeit: > 10 min Schutzindex: Klasse 1		Handschutz Material: Butylkautschuk Durchbruchzeit: > 10 min Schutzindex: Klasse 1	
	Haut- und Körperschutz: gemäß jeweiligem Arbeitsplatz		Haut- und Körperschutz gemäß jeweiligem Arbeitsplatz	
	Atemschutz: Filtertyp A-P		Atemschutz: Filtertyp A-P	

## 6.5 Berechnung der maximal zulässigen Fertigungskosten

Zum Auftrag der Schicht wird ein anderes Beschichtungsverfahren benötigt. Somit wird lediglich berechnet, auf wie viel Prozent der jetzigen Fertigungskosten die zukünftigen Fertigungskosten abgesenkt werden müssen. Vorgegangen wird entsprechend der im Kapitel 5 beschrie-

benen Formeln. Da nun die geplanten Materialkosten hinreichend bekannt sind, kann die Formel 1 nach den Fertigungskosten umgestellt werden. Als Berechnungsgrundlage für das Material werden die folgenden Parameter angenommen:

- 2717.82 € pro 18 Liter Beschichtungsmaterial
- Materialverlustfaktor von 1,6
- Maximale Schichtdicke von 100  $\mu\text{m}$
- Gleitflächengröße entsprechend der Zeichnungen

Das Ergebnis ist, dass sich eine 10-prozentige Kostenreduktion einstellt, wenn die Fertigungskosten für den URg 57 Gleitstuhl auf 93,7 % und für den URg 33 Gleitstuhl auf 104,2 % der aktuellen Kosten abgesenkt werden. Das Ergebnis des URg 33 Gleitstuhls ist so zu deuten, dass es keine Einsparungen bei dem Fertigungsverfahren bedarf und sich die 10-prozentige Kostenersparnis allein mit den geänderten Materialparametern realisieren lassen würde. Vorausgesetzt, die Kosten für den neuen Beschichtungsprozess sind nicht höher als die aktuellen Kosten. Für den URg 57 Gleitstuhl müssten die Kosten um ca. 7 % gesenkt werden, im Vergleich zum jetzigen Stand.

## 6.6 Aufbringung des Beschichtungsmaterials

Die Vorbehandlung des Substrates ist ein entscheidender Bestandteil für das Gelingen der Schicht. Damit eine ausreichende Haftfestigkeit erreicht wird, muss die Substratoberfläche frei von Fett und Öl sein. Für eine solche Vorreinigung bieten sich unter anderem die bereits beschafften Ultraschallreinigungsbecken an [94].

Des Weiteren muss die Oberfläche aufgeraut werden. Vom Hersteller wird das Sandstrahlen oder Phosphatieren empfohlen. Die fertig gestrahlte Oberfläche soll laut DIN EN 13507:2018 eine Oberflächengüte von Sa 3, beschrieben in EN ISO 8501-1:2017, aufweisen. Darin ist vermerkt, dass auf der aufgerauten Oberfläche keine sichtbaren Schatten oder sonstige Verunreinigungen erkennbar sein dürfen [95]. Das Phosphatieren sorgt in Verbindung mit dem Gleitlack auch für eine höhere Korrosionsbeständigkeit. Bei Bedarf kann auch das Sandstrahlen mit dem Phosphatieren kombiniert werden. Insbesondere der verbesserte Widerstand gegen Korrosion durch das Phosphatieren stellt eine gute Verbesserung gegenüber dem Strahlen dar [40]. Für eine Erprobung kommen alle drei Oberflächenvorbehandlungsverfahren in Frage und müssen daher in Vorversuchen gegeneinander abgewogen werden.

Anschließend wird das vorbereitete Beschichtungsmaterial aufgetragen. Das kann mittels handgeführter Lackierpistole oder mittels elektrostatisch unterstützter Sprühprozesse bewerkstelligt werden [40]. Für die benötigten Vorversuche kann das Beschichtungsmaterial der Einfachheit halber handgeführt aufgetragen werden. Für die industrielle Massenfertigung ist eine maschinell geführte, elektrostatisch unterstützte Lackierung vielversprechend. Eine ähnliche Anlage existiert bereits in der Vulkanisationsabteilung, wo ein Primer auf Bauteile für die

anschließende Vulkanisation aufgebracht wird [94]. Dieses Verfahren muss lediglich so abgeändert werden, dass nur die gewünschte Gleitfläche beschichtet wird. Durch dieses Verfahren werden dann verglichen mit dem Lichtbogenspritzen sehr geringe Materialverlustfaktoren ermöglicht.

## **6.7 Werkstoffbewertung Klübertop TP 47-391 gegen AlSi11**

Die Werkstoffbewertung vom Klübertop TP 47-391, verglichen mit dem bisher verwendeten AlSi11 mit Wachsversiegelung, wird erneut mit einer Gegenüberstellung in Tabelle 5 der beiden Materialien bewerkstelligt. Das Resultat ist, dass die Materialien einen vergleichbaren Gebrauchswert zeigen. Die Preisdifferenz zwischen den beiden Materialien ist dabei deutlich geringer, als die CES-Analyse vermuten lässt [96]. Das hat zur Folge, dass die Kosten durch die reduzierte Schichtdicke des neuen Beschichtungsmaterials ähnlich den aktuellen Schichtkosten sind. Aus HSEE-Gesichtspunkten schneidet das neue Material sichtbar schlechter ab als das AlSi11, dennoch entspricht es den Anforderungen der vaTTG. Zu der UV-Beständigkeit können auch nach möglichen UV-Langzeitprüfungen keine genauen Rückschlüsse gezogen werden, wie sich die organischen Bestandteile des neuen Beschichtungsmaterials unter verschiedenen Umwelteinflüssen verhält [97]. Somit können Versuche mit UV-Strahlung lediglich repräsentative Ergebnisse hervorbringen. Das Klübertop TP 47-391 lässt sich im Gegensatz zum thermischen Spritzen mit sehr geringem Materialverlustfaktor durch elektrostatisch unterstütztes Spritzen auftragen [98]. Der größte Vorteil ist, dass das neue Beschichtungsmaterial, entsprechend der Aufgabenstellung, nicht auf den Auftrag einer Wachsversiegelung angewiesen ist. Das heißt, sobald die Schicht in der gewünschten Schichtdicke aufgetragen und ausgehärtet ist, ist diese sofort gebrauchsfertig [40]. Zusammenfassend kann gesagt werden, wenn das neue Beschichtungsmaterial in den Prüfungen überzeugt, stellt es ein adäquates Material dar. Begründen lässt sich das damit, dass das Wirkprinzip beider Schichten darauf beruht, dass ein Fest- bzw. Langzeitschmierstoff in der erzeugten Beschichtung eingebettet ist, der die gewünschten Eigenschaften hervorruft.

Tabelle 5: Gegenüberstellung AlSi11 und Klübertop TP 47-391

	<b>AlSi11 (ungewachst)</b>	<b>Klübertop TP 47-391 [40]</b>
<b>max. Schichtdicke</b>	>400 µm [11]	100 µm [40]
<b>Stoffform</b>	Draht aufgespult [73]	Lack in Dose oder Hobbock
<b>Substrat Vorbereitung</b>	Entfetten (entfällt) Strahlen [99]	Entfetten Strahlen oder Phosphatieren
<b>Aufbringart</b>	Thermisches Spritzen	elektrostatisch unterstützter Sprühprozess möglich
<b>Nachbehandlung</b>	Wachsversiegelung [10]	Lack muss ablüften, anschlie- ßend durch Temperatur ausge- härtet werden
<b>Korrosionsbeständig- keit</b>	Ab Schichtdicke 150 µm genügend, gut nach Versiege- lung. [11]	Gut, kann durch vorheriges Phosphatieren verbessert wer- den.
<b>Preis je dm<sup>3</sup></b>	ca. 107,5 € [96]	150,99 € [100]
<b>HSEE-Bewertung</b>	Ungefährlich, Keine besonderen Sicherheitsvorkeh- rungen benötigt [101]	Ungefährlich für den Mensch, schädlich für Wasserorganismen und erhöhte Sicherheitsvorkeh- rungen vonnöten[91], [92]
<b>UV-Beständigkeit</b>	Nicht anwendbar	Unbekannt, 20 Jahre sind ein optimistisches Ziel [87]
<b>Standzeit</b>	Sehr gut [10]	sehr gut
<b>Adhäsion auf Substrat</b>	>40 MPa [11]	sehr gut

## 7 Prüfplan

Der Prüfplan stellt das Aufbringen einer funktionstüchtigen Schicht auf dem Bauteil sicher. Als Probekörper dienen dabei die genormten Prüflinge oder die derzeit verwendeten werksinternen Probekörper. Die Umsetzung der Prüfungen soll nach Norm oder durch im Werk angewandte Prüfverfahren erfolgen. Somit kann eine Vergleichbarkeit mit bisherigen Beschichtungsprüfungen bewerkstelligt werden.

Die in dieser Arbeit erstellte Materialfreigabepfung ist dafür verantwortlich, dass das verwendete Beschichtungsmaterial den aus der Aufgabenstellung entnommenen Ansprüchen genügt. Die Prüfungen, die sich auf eine Wechselwirkung zwischen Substrat und Beschichtungsmaterial beziehen, werden einmalig für jedes verwendete Substrat durchgeführt. Damit kann sichergestellt werden, dass alle verwendeten Materialkombinationen miteinander harmonieren. Die Prüfungen, die sich auf die tribologischen Eigenschaften der Schicht beziehen, sollen lediglich geprüft werden, wenn das Beschichtungsmaterial geändert wird. [10]

Die LCC-Bewertung ist eine aus dem Prüfplan hervorgehende Bewertung, die durchgeführt wird, wenn das endgültige Produkt sehr genau bekannt ist. Dazu gehören dann die Kosten der Fertigung, der Wartung und der Entsorgung. Da das endgültige Beschichtungsmaterial erst

nach Durchführung der Versuche bestimmt werden kann, kann die LCC-Bestimmung zum jetzigen Zeitpunkt nicht durchgeführt werden. Ebenfalls muss sichergestellt sein, dass das Beschichtungsmaterial über die gesamte Lebenszeit von 20 Jahren wartungsfrei ist. Dieser Punkt ist anhand der vorgeschlagenen Prüfungen nicht genau abschätzbar, somit sind auch Feldversuche vonnöten. [102]

## 7.1 Temperaturschwankungen

Stoffe besitzen unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten [103]. Durch diesen Umstand entsteht eine Differenz in der Längenänderung zwischen Schicht und Bauteil. Der Hintergrundgedanke dieser Prüfung ist es sicherzustellen, dass Temperaturschwankungen die Anhaftung und Qualität der Beschichtung nicht negativ beeinflussen. Bewerktelligt wird das mit einer Temperaturwechselprüfung nach DIN EN 60068. Diese Norm beschreibt in erster Linie die Prüfung von elektrischen Geräten bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen, kann aber auch für sonstige Prüflinge herangezogen werden. Hier sind die Teile 2-1 und 2-2, die für die Temperaturwechselprüfung ausschlaggebenden Prüfungen. Dieses Verfahren dient dazu, im Prüfkörper mechanische Beanspruchungen herbeizuführen. Dadurch kann der Prüfkörper anfälliger für Folgeprüfungen werden. [102]

## 7.2 Widerstand gegen Korrosion

Der Widerstand gegen Korrosion soll eine auf dem Temperaturwechselversuch aufbauende Prüfung sein. Durch Temperaturschwankungen herbeigeführte Defekte zwischen Schicht und Substrat wirken sich somit negativ auf das Korrosionsverhalten aus. Effekte der eindringenden Korrosion oder einer herbeigeführten Unterrostung der Schicht zeigen sich in den darauffolgenden Prüfungen.[102] Bei den aufbauenden Prüfungen handelt es sich um die Haftzugprüfung und das Gitterschnittverfahren. Der Widerstand gegen Korrosion wird nach DIN EN ISO 9227 als nicht geritzte Probe ermittelt und anschließend ausgewertet. Das geschieht, bevor die Proben einer weiterführenden Prüfung unterzogen werden. Damit eine Probe insbesondere auf ihr Verhalten bei einer mechanischen Beschädigung geprüft werden kann, kann ein separater Versuch mit einer geritzten Probe durchgeführt werden. Bei weiteren Tests findet diese Probe dann jedoch keine Anwendung mehr.

## 7.3 Gitterschnittverfahren

Das Gitterschnittverfahren nach DIN EN ISO 2409 wird zur Bewertung der Ergebnisse nach Temperaturwechselprüfung und Korrosionswiderstandsprüfung angewendet. Aus dem Verfahren lassen sich keine Rückschlüsse auf die Haftfestigkeit ziehen. Es dient dem Bewerten des Widerstandes der Schicht gegen Trennung vom Substrat. Das Ergebnis wird visuell ausgewertet und in eine von sechs Gruppen eingeteilt. Alternativ kann die Prüfung auch als bestanden/nicht bestanden Prüfung genutzt werden. Der Gleitlack Klübertop TP 47-391 erreicht in

der Gitterschnittprüfung 1Gt. Dieses Ergebnis sollte durch die vorgelagerten Versuche nicht beeinträchtigt werden. [104]

## 7.4 Haftzugversuch

Die Ermittlung der Haftzugfestigkeit entsprechend DIN EN ISO 14916 wird nach Temperaturwechselprüfung und Korrosionswiderstandsprüfung angewendet. Somit können konkrete Werte ermittelt werden, die Aussagen, wie stark das Beschichtungsmaterial auf dem Substrat anhaftet. Dieser ermittelte Wert wird dann mit dem vom Auftraggeber gesetzten Ziel abgeglichen und in bestanden/ nicht bestanden eingeteilt. Diese Prüfung wird bereits für die derzeit verwendete thermisch gespritzte Schicht angewendet. [105]

## 7.5 Künstliche Alterung unter Ultravioletter Strahlung

Die künstliche Alterung unter UV-Lichtquellen findet Anwendung, um Rückschlüsse auf das allgemeine Alterungsverhalten des Beschichtungsmaterials zu finden. Verwendung findet hierfür die Normreihe DIN EN ISO 4892. Konkrete Rückschlüsse auf die Langzeitstabilität lassen sich damit nicht ermitteln. Es können lediglich repräsentative Ergebnisse ermittelt werden. Selbst sehr kleine Änderungen können die Ergebnisse stark beeinflussen.[97] Der Hersteller empfiehlt, die Gebrauchsdauer unter Serienbedingungen zu ermitteln [87].

## 7.6 Zwei-Komponenten-Gleitverschleiß

Der Zwei-Komponenten-Gleitverschleiß simuliert das tribologische System unter Optimalbedingungen. Das heißt, es wird davon ausgegangen, dass es keine Verschmutzungen oder Defekte zum Startzeitpunkt gibt und die Prüflast über die gesamte Reibfläche abgeleitet wird. Damit eine Vergleichbarkeit zu bisherigen Beschichtungen hergestellt werden kann, wird das bisher verwendete Verfahren, welches im Bericht „FE-Projekt Schmierungslose Gleitplatten“ beschrieben ist, weiterhin durchgeführt. Vorgelagert zu diesem Versuch ist die künstliche UV-Alterung.[10] Von einer Prüfung nach DIN ISO 7148-2 wird abgesehen, da das bisher verwendete Verfahren die real vorherrschenden Bedingungen besser darstellt. Das Vorgehen geht dann auf Kosten der Vergleichbarkeit zu anderen Quellen.

## 7.7 Drei-Komponenten-Abrasivverschleißtest

Damit das vom Auftraggeber geforderte Abrasivverschleißverhalten ermittelt werden kann, soll das im Bericht „FE-Projekt Schmierungslose Gleitplatten“ beschriebene Verfahren angewendet werden. Der Versuch gibt Auskunft darüber, wie hoch die Standzeit der Schicht unter Einwirkung eines abrasiven Mediums ist. Dieser Versuch wird ebenfalls nach dem UV-Versuch durchgeführt. [10]

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Bachelorarbeit wurde ein alternativer Beschichtungsstoff für das derzeit verwendete AlSi11 ermittelt. Hauptziel ist es, eine zehnpromtente Kostenreduktion durch Änderungen am Material und im Prozess zu erreichen. Dafür wurde der aktuelle Stand der Technik erstellt, der aufzeigt, wie sich Gleitflächen hinsichtlich ihrer tribologischen Performance her optimieren lassen. Nach der Aufnahme des Ist-Zustandes wurde eine Herstellkostenanalyse durchgeführt. Das Ergebnis dieser Analyse ist, dass der derzeit ausgeführte Prozess, mit unzulässig hohen Materialverlustfaktoren und teils hohen Leerlaufzeiten, sehr ineffizient ist. Eine Optimierung der Herstellkosten durch Reduktion der Materialkosten für die Beschichtung ist nur bedingt möglich. Durch eine Analyse mit der Granta Edupack Datenbank konnte nachgewiesen werden, dass es kein nennenswert günstigeres Material gibt als das bisher verwendete Material AlSi11. Die Schlussfolgerung ist somit die Kostenreduktion durch Materialeinsparungen und Prozessoptimierungen herbeizuführen. Rechnerisch ist dargestellt worden, inwieweit die Fertigungskosten mit den angepassten Materialparametern gesenkt werden müssen. Zum Erreichen der im Zuge der Aufgabenstellung geforderten Beschichtungsmaterialeigenschaften wird das Verwenden eines Gleitlackes vorgeschlagen. Als vielversprechende Alternative wurde das Material „Klübertop TP 47-391“ ermittelt. Zu guter Letzt wurden Prüfungen geplant und ausgewählt, die zur Ermittlung der geforderten Eigenschaften des Beschichtungsstoffes benötigt werden. Eine LCC-Betrachtung konnte aufgrund mangelnder Datenlage nicht durchgeführt werden.

Die vorliegende Arbeit bietet eine Grundlage zur Prüfung des zukünftigen Beschichtungsstoffes hinsichtlich seiner Eignung. Daraus lassen sich dann erste Rückschlüsse für eine LCC-Bewertung schließen und faktenbasierte konkrete Vergleiche mit dem bisher verwendeten Beschichtungswerkstoff aufstellen. Des Weiteren werden Handlungsempfehlungen gegeben, nach denen in zukünftigen Arbeiten der Prozess optimiert werden kann. Somit kann dann eine zehnpromtente Kostenreduktion erreicht werden.

## 9 Literatur

- [1] „Transportleistung der Eisenbahnen im Güterverkehr bis 2024“, Statista. Zugriffen: 28. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2975/umfrage/transportleistung-der-eisenbahnen-im-gueterverkehr-in-deutschland/>
- [2] Deutsche Bahn AG, „Bund und DB entwickeln Hochleistungsnetz für deutlich mehr Zuverlässigkeit und Wachstum auf der Schiene“, [www.deutschebahn.com](http://www.deutschebahn.com). Zugriffen: 28. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart\\_zentrales\\_uebersicht/Bund-und-DB-entwickeln-Hochleistungsnetz-fuer-deutlich-mehr-Zuverlaessigkeit-und-Wachstum-auf-der-Schiene-7762666](https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Bund-und-DB-entwickeln-Hochleistungsnetz-fuer-deutlich-mehr-Zuverlaessigkeit-und-Wachstum-auf-der-Schiene-7762666)
- [3] „Reisende im Schienenpersonenverkehr bis 2022“, Statista. Zugriffen: 28. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/13626/umfrage/reisende-im-schienenpersonenverkehr-der-db-ag/>
- [4] „Themenseite: Nachhaltiger Konsum“, Statista. Zugriffen: 28. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/themen/4331/nachhaltiger-konsum/>
- [5] Deutsche Bahn AG, „Infrastrukturzustands- und -entwicklungsbericht 2022“, Apr. 2023.
- [6] voestalpine AG, „PERFORMANCE ON TRACK® - voestalpine Railway Systems“. Zugriffen: 28. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.voestalpine.com/railway-systems/de/>
- [7] voestalpine Railway Systems GmbH, „Metal Engineering Division - voestalpine“. Zugriffen: 28. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.voestalpine.com/group/de/konzern/ueberblick/organigramm/metal-engineering/>
- [8] voestalpine Turnout Technology Germany GmbH, „voestalpine Railway Systems“. Zugriffen: 28. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.voestalpine.com/railway-systems/de/standorte/voestalpine-turnout-technology-germany/>
- [9] voestalpine Railway Systems GmbH, „Standorte - voestalpine Railway Systems“. Zugriffen: 13. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.voestalpine.com/railway-systems/de/standorte/voestalpine-turnout-technology-germany/standorte/>
- [10] M. Marx, „FE-Projekt Schmierungslose Gleitplatten (120200961) VORSTUDIE“, Kirchmöser, Abschlussbericht FE-2017-015-0-FEP, Sep. 2017.
- [11] W. Kunitz, „Abschlussbericht zum Thermischen Spritzen von Verschleißschutzschichten auf Weichenbauteilen (Gleitstühlen)“, Kirchmöser, Abschlussbericht, 2003.
- [12] M. Marx, „Lastenheft Alternative Beschichtungswerkstoffe für Gleitstuhlanwendungen in Weichen“. 13. Juni 2023.
- [13] H. Henker und G. Berg, *Eisenbahnbau Berg/Henker Weichen*. Berlin: Transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, 1987.
- [14] M. Marx, „FE-120200961 Schmierungslose Gleitplatten Vorstudie - Projektantrag“. 2014.
- [15] M. Marx, Persönliche Kommunikation, 12. September 2023.
- [16] M. Schmock, „Weichentechnik“, 18. März 2022.
- [17] M. Mißler, „Ausrüstungsstandard Schotteroberbau für Gleise und Weichen DBS 820.2010“. 15. Oktober 2021.
- [18] voestalpine Railway Systems GmbH, „PIROLL für Zungenvorrichtungen mit niedrigem Zungenprofil - voestalpine Railway Systems“. Zugriffen: 13. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.voestalpine.com/railway-systems/de/produkte/piroll-zungenvorrichtungen-mit-niedrigem-zungenprofil/>
- [19] voestalpine Railway Systems GmbH, „Elastisches Zungenrollsystem vaROLL - voestalpine Railway Systems“. Zugriffen: 13. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.voestalpine.com/railway-systems/de/produkte/elastisches-zungenrollsystem-varoll/>
- [20] E. Kühne, „Gleitstuhl für Weichen“, 66600, 5. Mai 1969

- [21] Deutsche Reichsbahn Weichenwerk Brandenburg, „Abschlussbericht zur Dienstaufgabe „Entwicklung und Erprobung wartungsarmer Gleitstühle“, Brandenburg, Abschlussbericht, März 1980.
- [22] F. Bauer, *Tribologie: prägnant und praxisrelevant*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. doi: 10.1007/978-3-658-32920-4.
- [23] Z. Paluncic und M. Mander, „Vorrichtung zum Benetzen oder Schmierens eines Schienenkopfs“, EP2551171B1, 3. September 2014 Zugriffen: 14. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://patents.google.com/patent/EP2551171B1/de?q=\(weichenverschluss\)&assignee=voestalpine](https://patents.google.com/patent/EP2551171B1/de?q=(weichenverschluss)&assignee=voestalpine)
- [24] A. 6302 L. D. Kais und H. 6352 O.-M. D. Gebhardt, „Application filed by Voestalpine BWG GmbH“, DE3709126C2, 24. Mai 1989 Zugriffen: 14. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://patents.google.com/patent/DE3709126C2/de?q=\(weichenverschluss\)&assignee=voestalpine](https://patents.google.com/patent/DE3709126C2/de?q=(weichenverschluss)&assignee=voestalpine)
- [25] S. Jakobi, „Fette, Öle, Wachse und Harze“, in *Betriebs-Chemie für Maschinenbauer und Elektrotechniker: Ein Lehr- und Hilfsbuch zur Einführung in die Werkstoffkunde für Maschinen- und Elektrotechniker sowie für den Unterricht an höheren Maschinenbauschulen, Maschinenbauschulen Betriebsfachschulen und elektrotechnischen Lehranstalten*, S. Jakobi, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer, 1930, S. 82–86. doi: 10.1007/978-3-662-36681-3\_7.
- [26] *Chemisch-technische Untersuchungsmethoden*, Fünfte, Vollständig umgearbeitete und Vermehrte Auflage. in *Chemisch-technische Untersuchungsmethoden*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1905. doi: 10.1007/978-3-662-38269-1.
- [27] S. N. Ameli Kalkhoran, M. Vahdati, Z. Zhang, und J. Yan, „Influence of Wax Lubrication on Cutting Performance of Single-Crystal Silicon in Ultraprecision Microgrooving“, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Technol.*, Bd. 8, Nr. 2, S. 611–624, März 2021, doi: 10.1007/s40684-020-00198-3.
- [28] H. Tsutsumi, A. Kyusojin, und K. Fukuda, „Tribology Characteristics Estimation of Slide-way Surfaces Finished by Scraping“, *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. C*, Bd. 72, S. 3009–3015, Sep. 2006, doi: 10.1299/kikaic.72.3009.
- [29] K. Obwald, J. Gissel, und I. Lochmahr, „Macroanalysis of Hand Scraping“, *J. Manuf. Mater. Process.*, Bd. 4, S. 1–12, Sep. 2020, doi: 10.3390/jmmp4030090.
- [30] S. Yan, Y. Xue, L. Wei, und Z. Wang, „The influences of lubricant groove shape on the tribological properties of journal bearing under the grease lubrication conditions“, *Ind. Lubr. Tribol.*, Bd. 73, Nr. 3, S. 493–499, Jan. 2021, doi: 10.1108/ILT-12-2020-0443.
- [31] L. Wang, X. Zhao, M. He, und W. Zhang, „Effect of micro grooves on lubrication performance of friction pairs“, *Meccanica*, Bd. 56, Nr. 2, S. 351–364, Feb. 2021, doi: 10.1007/s11012-020-01295-y.
- [32] R. Kromer, „Laser Patterning Pretreatment before Thermal Spraying: A Technique to Adapt and Control the Surface Topography to Thermomechanical Loading and Materials“, *J. Therm. Spray Technol.*.
- [33] V. U. Bagade, „Effect of Laser Surface Texturing on Coating Adherence and Tribological Properties of CuNiIn and MoS<sub>2</sub> Coating“, *Trans Indian Inst Met*, 2022.
- [34] A. Wali, T. Platt, A. Meijer, und D. Biermann, „Micro structuring tool steel components using Precise Electrochemical Machining (PECM)“, *Prod. Eng.*, Bd. 17, Nr. 3–4, S. 473–481, Juni 2023, doi: 10.1007/s11740-022-01167-2.
- [35] K. Chen, X. Yang, Y. Zhang, H. Yang, G. Lv, und Y. Gao, „Research progress of improving surface friction properties by surface texture technology“, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Bd. 116, Nr. 9–10, S. 2797–2821, Okt. 2021, doi: 10.1007/s00170-021-07614-1.
- [36] V. B. Peddakondigalla u. a., „Friction and wear performance of surface textured bearing steel AISI 52100: a study of texture distribution“, *Int. J. Interact. Des. Manuf. IJIDeM*, Juli 2023, doi: 10.1007/s12008-023-01460-z.

- [37] DIN-Normenausschuss Technische Grundlagen (NATG), „DIN 8580:2022 Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung“. Beuth Verlag GmbH, Dezember 2022.
- [38] ADELHELM Verwaltungs- und Beteiligungs GmbH, „Gleitbeschichtung & Trockenschmierung auf Elastomer/ Metall /Kunststoff“, ADELHELM Unternehmensgruppe. Zugegriffen: 4. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adelhelm.de/beschichtungen/gleitbeschichtung-trockenschmierung.html>
- [39] CARL BECHEM GMBH, „9100419\_TDB\_DEU\_berucoat\_ak\_936\_9100419\_de\_de“. 1. September 2022.
- [40] Klüber Lubrication München GmbH & Co. KG, „Klübertop TP 47-391\_A\_B\_Komp. A“. 15. August 2023.
- [41] P. Zhang, „A parameterized deposition rate model of electrostatic spraying rotating bell atomizer“, *J Coat Technol Res*, 2023.
- [42] Institute of Space Technology Islamabad, Pakistan, S. Younus, M. Arshad, und Comsats University Lahore, Pakistan, „THERMAL SPRAY COATING: A BRIEF UNDERSTANDING“, *Int. J. Adv. Res.*, Bd. 7, Nr. 10, S. 919–928, Okt. 2019, doi: 10.21474/IJAR01/9910.
- [43] DIN-Normenausschuss Schweißen und verwandte Verfahren (NAS), „DIN EN ISO 14917 Thermisches Spritzen - Begriffe, Einteilung“. Beuth Verlag GmbH, 1. August 2017.
- [44] M. U. Schoop, „Method of plating or coating with metallic coatings“, US1128059A, 9. Februar 1915 Zugegriffen: 20. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://patents.google.com/patent/US1128059A/en?q=US1128059>
- [45] Y. Kawaguchi, F. Miyazaki, M. Yamasaki, Y. Yamagata, N. Kobayashi, und K. Muraoka, „Coating Qualities Deposited Using Three Different Thermal Spray Technologies in Relation with Temperatures and Velocities of Spray Droplets“, *Coatings*, Bd. 7, Nr. 2, S. 27, Feb. 2017, doi: 10.3390/coatings7020027.
- [46] K. Hartz-Behrend, J. Schaup, J. Zierhut, und J. Schein, „Controlling the Twin Wire Arc Spray Process Using Artificial Neural Networks (ANN)“, *J. Therm. Spray Technol.*, Bd. 25, Nr. 1–2, S. 21–27, Jan. 2016, doi: 10.1007/s11666-015-0341-0.
- [47] H. Koivuluoto, „A Review of Thermally Sprayed Polymer Coatings“, *J Therm Spray Tech*, S. 1750–1764, Mai 2022.
- [48] Z. Wu, S. Li, X. Fan, F. Vogel, J. Mao, und X. Tu, „In-situ preparation of robust self-lubricating composite coating from thermally sprayed ceramic template“, *J. Adv. Ceram.*, Bd. 12, Nr. 2, S. 357–372, Feb. 2023, doi: 10.26599/JAC.2023.9220689.
- [49] D. Goljandin, H. Sarjas, P. Kulu, H. Käerdi, und V. Mikli, „Metal-Matrix Hardmetal/Cermet Reinforced Composite Powders for Thermal Spray“, *Mater. Sci.*, Bd. 18, Nr. 1, S. 84–89, März 2012, doi: 10.5755/j01.ms.18.1.1348.
- [50] OC Oerlikon Management AG, „Thermische Spritzverfahren“. Zugegriffen: 20. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.oerlikon.com/metco/de/loesungen-und-technologien/technologie/thermische-spritzverfahren-1/>
- [51] B. Schultrich, „Beschichtungsverfahren: Teil 1 – Physikalische Dampfphasenabscheidung“, *Vak. Forsch. Prax.*, Bd. 18, Nr. 1, S. 34–35, Feb. 2006, doi: 10.1002/vipr.200690001.
- [52] B. Schultrich, „Beschichtungsverfahren: 13 Thermische Gasphasenabscheidung“, *Vak. Forsch. Prax.*, Bd. 20, Nr. 1, S. 40–41, Feb. 2008, doi: 10.1002/vipr.200890002.
- [53] M. Liu u. a., „Development of an Alternative to the Plasma Cladding Process: the Plasma Spray Melting Technology“, *J. Therm. Spray Technol.*, Bd. 32, Nr. 5, S. 1362–1377, Juni 2023, doi: 10.1007/s11666-023-01574-6.
- [54] N. Sommer, F. Stredak, und S. Böhm, „High-Speed Laser Cladding on Thin-Sheet-Substrates—Influence of Process Parameters on Clad Geometry and Dilution“, *Coatings*, Bd. 11, Nr. 8, S. 952, Aug. 2021, doi: 10.3390/coatings11080952.
- [55] X. Cao, L. Wang, R. He, L. Zhou, und C. Lin, „Characterization of Fe-Based Layers Deposited by Laminar Plasma Cladding on Low-Carbon Steel“, *J. Therm. Spray Technol.*, Bd. 32, Nr. 7, S. 2104–2111, Okt. 2023, doi: 10.1007/s11666-023-01634-x.

- [56] A. Abyazi und M. Takht Kiyani, „Solid Particle Erosion Wear Characteristics of WC-Reinforced Ni-Based Coating Deposited by Oxy-Acetylene Flame Welding“, *J. Therm. Spray Technol.*, Bd. 32, Nr. 5, S. 1242–1259, Juni 2023, doi: 10.1007/s11666-023-01547-9.
- [57] „Wie funktioniert die Zylinderinstandsetzung? – Metallmanufaktur Weber – Blog“. Zugegriffen: 21. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.weber-metallmanufaktur.net/blog/wie-funktioniert-die-zylinderinstandsetzung/>
- [58] Österreichische Bundesbahn, „Auftragslöten auf Eisenwerkstoffen“, 1971.
- [59] Granta Edupack, Level 3, 2023.
- [60] igus GmbH, „Gleitfolien iglidur® von igus®“. Zugegriffen: 22. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.igus.de/tribo-tape/gleitfolie>
- [61] H. Orasche, J. Rieger, und H. Steiger, „Gleitstuhl, Gleitplatte bzw. Rippenplatte für Schienenweichen oder -kreuzungen“, EP0401201A1, 5. Dezember 1990 Zugegriffen: 22. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://patents.google.com/patent/EP0401201A1/de>
- [62] Schwihag Gleis- und Weichentechnik, „low 57.1020/7 Anordnungstabellen und Stücklisten für Zungenrollvorrichtungen System Schwihag Weichen UIC 60“. August 2012.
- [63] M. Marx, „Variation Stpk ZVR60-500-1zu12 - Übersicht“. 6. August 2015.
- [64] F. Meyer und S. Lienhard, „Herzstückrollvorrichtung“, DE102012017982A1, 13. März 2014 Zugegriffen: 14. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://patents.google.com/patent/DE102012017982A1/de?q=\(weichenverschluss\)&assignee=voestalpine](https://patents.google.com/patent/DE102012017982A1/de?q=(weichenverschluss)&assignee=voestalpine)
- [65] C. Scholz und F. Meyer, „Vorrichtung zum Umstellen von Weichenzungen“, DE102006026137A1, 6. Dezember 2007 Zugegriffen: 14. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://patents.google.com/patent/DE102006026137A1/de?q=\(zungenrollvorrichtung\)&oq=zungenrollvorrichtung](https://patents.google.com/patent/DE102006026137A1/de?q=(zungenrollvorrichtung)&oq=zungenrollvorrichtung)
- [66] A. Kais, E. Nuding, und S. Benenowski, „Vorrichtung zum Verriegeln einer weichenzunge“, EP0711234A1, 15. Mai 1996 Zugegriffen: 14. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://patents.google.com/patent/EP0711234A1/de?q=\(verschluss\)&assignee=bwg&oq=\(verschluss\)+assignee:bwg](https://patents.google.com/patent/EP0711234A1/de?q=(verschluss)&assignee=bwg&oq=(verschluss)+assignee:bwg)
- [67] A. Kais, E. D.-I. (Fh) Nuding, und S. Benenowski, „Vorrichtung zum Verriegeln einer Weichenzunge“, EP0455182B1, 1. Februar 1995 Zugegriffen: 14. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://patents.google.com/patent/EP0455182B1/de?q=\(verschluss\)&assignee=bwg&oq=\(verschluss\)+assignee:bwg](https://patents.google.com/patent/EP0455182B1/de?q=(verschluss)&assignee=bwg&oq=(verschluss)+assignee:bwg)
- [68] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „Thermisches Spritzen – Vorbehandlung von Oberflächen metallischer Werkstücke und Bauteile für das thermische Spritzen“. 2018.
- [69] R. Topel, Persönliche Kommunikation, 26. August 2022.
- [70] I. N. Kravchenko, S. V. Kartsev, S. A. Velichko, Yu. A. Kuznetsov, und A. G. Pastukhov, „Effect of Component Surface Preparation on Coating Adhesive Strength during Plasma Spraying“, *Refract. Ind. Ceram.*, Bd. 62, Nr. 2, S. 168–174, Juli 2021, doi: 10.1007/s11148-021-00578-5.
- [71] Y. Ding, H. Li, und Y. Tian, „Bristle Blasting Surface Preparation in Thermal Spraying“, *J. Therm. Spray Technol.*, Bd. 28, Nr. 3, S. 378–390, Feb. 2019, doi: 10.1007/s11666-019-00825-9.
- [72] U. Heise, „P 4.11.024 AA Beschichten und Versiegeln von Gleitstühlen mit AlSi oder Mo-lybdän“. 31. Januar 2013.
- [73] Sulzer Metco, „Brenner PPG Lichtbogenspritzen SmartArc®“, 2006.
- [74] D. Kumar, Q. Murtaza, und R. C. Singh, „Sliding wear behavior of aluminum alloy coating prepared by two-wire electric arc spray process“, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Bd. 85, Nr. 1–4, S. 237–252, Juli 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7920-6.
- [75] M.-M. Matz und M. Aumiller, „Practical Comparison of Cylindrical Nozzle and De Laval Nozzle for Wire Arc Spraying“, *J. Therm. Spray Technol.*, Bd. 23, Nr. 8, S. 1470–1477, Dez. 2014, doi: 10.1007/s11666-014-0156-4.

- [76] „> Sondereinzelkosten » Definition, Erklärung & Beispiele + Übungsfragen“, *BWL-Lexikon.de*. Zugegriffen: 6. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bwl-lexikon.de/wiki/sondereinzelkosten/>
- [77] W. Dax, *Tabellenbuch für Metalltechnik: theoretische Grundlagen - technisches Zeichnen - Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung - Maschinenelemente - Fertigungstechnik*, 4., Überarb. u. erw. Aufl. Hamburg: Handwerk u. Technik, 1989.
- [78] H. Daßler, Persönliche Kommunikation, 31. Juli 2023.
- [79] A. Brandt, Persönliche Kommunikation, 8. August 2023.
- [80] S. Reimer, „Was ist Wertschöpfung und was ist Verschwendung?“, *Lean Service Institute*. Zugegriffen: 5. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.lean-service-institute.de/wertschoepfung\\_verschwendung/](https://www.lean-service-institute.de/wertschoepfung_verschwendung/)
- [81] A. Sonntag, „Instrument Makigami“. November 2015. Zugegriffen: 28. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.inf.uni-hamburg.de/de/inst/ab/itmc/research/completed/promidis/instrumente/makigami>
- [82] A. Sonntag, „Instrument Paarweiser Vergleich“. November 2015. Zugegriffen: 29. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.inf.uni-hamburg.de/de/inst/ab/itmc/research/completed/promidis/instrumente/paarweiser-vergleich>
- [83] C. Hübsch u. a., „Mikrostrukturieren von thermisch gespritzten Mo-Schichten für Anwendungen im Bereich hoher Reib- und Verschleißbeanspruchungen“, *Mater. Werkst.*, Bd. 44, Nr. 4, S. 304–310, Apr. 2013, doi: 10.1002/mawe.201300054.
- [84] DIN-Normenausschuss Eisen und Stahl (FES), „DIN EN 13674-1 Bahnanwendungen - Oberbau - Schienen - Teil 1: Vignolschienen ab 46 kg/m“. Beuth Verlag GmbH, Juli 2017.
- [85] TRUMPF SE + Co. KG, „Was ist Laserstrukturieren?“ Zugegriffen: 11. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.trumpf.com/de\\_DE/loesungen/anwendungen/oberflaechenbearbeitung-mit-dem-laser/laserstrukturierung/](https://www.trumpf.com/de_DE/loesungen/anwendungen/oberflaechenbearbeitung-mit-dem-laser/laserstrukturierung/)
- [86] L. R. Kanyane, T. J. Malepe, N. Malatji, und A. P. I. Popoola, „Synthesis and Characterization of Al-SiC Composite Coatings on 316L Stainless Steel Fabricated via Laser Cladding Technique“, *Metallogr. Microstruct. Anal.*, Bd. 10, Nr. 5, S. 601–609, Okt. 2021, doi: 10.1007/s13632-021-00778-y.
- [87] B. Kellerer, Persönliche Kommunikation, 24. August 2023.
- [88] Klüber Lubrication München GmbH & Co. KG, „SDS\_Klueber\_Gleitpan\_JF158\_A\_B\_Komp.\_A\_099197\_DE\_DE“. 7. Juni 2022.
- [89] B. Czack, „(V11) Neuen Gefahrstoff anfragen und beschaffen“, *Neuen Gefahrstoff anfragen und beschaffen*. Zugegriffen: 5. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: [http://bwg.wiki.voestalpine.net/Processes/NeuenGefahrstoffAnfragenUndBeschaffen?foswiki\\_origin=hGJekhKtckHSnzEBc0qUWn2P6Z8](http://bwg.wiki.voestalpine.net/Processes/NeuenGefahrstoffAnfragenUndBeschaffen?foswiki_origin=hGJekhKtckHSnzEBc0qUWn2P6Z8)
- [90] Klüber Lubrication München GmbH & Co. KG, „Leistungsstarke Gleitlacke ohne schädliche Lösungsmittel“, *Leistungsstarke Gleitlacke ohne schädliche Lösungsmittel*. Zugegriffen: 5. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.klueber.com/de/de/unternehmen/aktuelles/pressemitteilungen/leistungsstarke-gleitlacke-ohne-schaedliche-loesungsmittel/>
- [91] Klüber Lubrication München GmbH & Co. KG, „SDS\_Kluebertop\_TP\_47-391\_A\_B\_Komp.\_A\_099230\_DE\_DE“. 1. August 2023.
- [92] Klüber Lubrication München GmbH & Co. KG, „SDS\_KLUEBERTOP\_TH\_07\_KOMPONENTE\_B\_099232\_DE\_DE“. 31. August 2021.
- [93] Klüber Lubrication München GmbH & Co. KG, „SDS\_KLUEBER\_GLEITPAN\_JF158\_A\_B\_KOMP.\_B\_099198\_DE\_DE“. 7. September 2022.
- [94] M. Topel, Persönliche Kommunikation, 29. August 2023.
- [95] K. Bobzin, M. Öte, und M. A. Knoch, „Surface Pre-treatment for Thermally Sprayed ZnAl15 Coatings“, *J. Therm. Spray Technol.*, Bd. 26, Nr. 3, S. 464–472, Feb. 2017, doi: 10.1007/s11666-016-0507-4.
- [96] SAP Logon 770, 31. Juli 2023.

- [97] DIN-Normenausschuss Beschichtungsstoffe und Beschichtungen (NAB), „DIN EN ISO 4892-1 Kunststoffe - Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten - Teil 1 Allgemeine Anleitung“. Beuth Verlag GmbH, Oktober 2016.
- [98] Graco Inc., „Die Unterschiede zwischen konventionellen und elektrostatischen Spritzpistolen“. Zugriffen: 13. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.graco.com/de/de/in-plant-manufacturing/solutions/articles/conventional-vs-electrostatic-spray-guns.html>
- [99] C. Pillekeit, Persönliche Kommunikation, 8. März 2023.
- [100] T. Schönberner, Persönliche Kommunikation, 1. September 2023.
- [101] Oerlikon Metco Europe GmbH, „SDS\_Metco 8234 14ga“. 4. August 2023.
- [102] DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, „DIN EN 60068-1 Umgebungseinflüsse - Teil 1: Allgemeines und Leitfaden“. Beuth Verlag GmbH, September 2015.
- [103] R. Gomeriger u. a., Hrsg., *Tabellenbuch Metall*, 46., neu Bearb. und erw. Aufl. in Europa-Fachbuchreihe für Metallberufe. Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel - Nourney, Vollmer, 2014.
- [104] DIN-Normenausschuss Beschichtungsstoffe und Beschichtungen (NAB), „DIN EN ISO 2409 Beschichtungsstoffe - Gitterschnittprüfung“. Beuth Verlag GmbH, Dezember 2020.
- [105] DIN-Normenausschuss Schweißen und verwandte Verfahren (NAS), „DIN EN ISO 14916 Thermisches Spritzen - Ermittlung der Haftzugfestigkeit.pdf“. Beuth Verlag GmbH, August 2017.

## 10 Anhang

Der Anhang einer Bachelorarbeit ist ein wichtiger Teil der Arbeit, der zusätzliche Informationen, Daten und Materialien enthält, die für das Verständnis und die Validität der Forschung von Bedeutung sind. In diesem Abschnitt werden verschiedene Elemente präsentiert, die während des Forschungsprozesses gesammelt wurden, aber nicht unmittelbar in den Haupttext der Arbeit integriert wurden. Der Anhang bietet den Lesern die Möglichkeit, detailliertere Einblicke in die Methodik, die verwendeten Werkzeuge und die unterstützenden Informationen zu gewinnen.

## Gegenrechnung wie Realistisch die Werte aus dem SAP Logon 770 - System sind

Randbedingungen: Maximale zulässige Schichtdicke, Gleitfläche als Rechteckfläche vereinfacht  
Für URg 57:

$$D := 1,6 \text{ mm} \quad \rho := 2,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \quad \text{Schätzwert bezogen auf das Aluminium}$$

Experimenten ermittelter Verlustfaktor.  $Verlustf := 2,63$

$$A := \frac{\pi}{4} \cdot D^2 = 2,01 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$A \cdot \rho = 0,01 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$m := 80 \text{ g}$$

$$V_{\text{Beschichtung}} := \frac{m}{\rho} = 2,96 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$A_{\text{Beschichtung}} := \frac{V_{\text{Beschichtung}}}{300 \text{ } \mu\text{m}} = 0,1 \text{ m}^2$$

$$b := 170 \text{ mm}$$

$$L_{\text{Beschichtung}} := \frac{A_{\text{Beschichtung}}}{b} = 580,97 \text{ mm}$$

$$\frac{L_{\text{Beschichtung}}}{Verlustf} = 220,9 \text{ mm} \quad \text{->erscheint realistisch, tatsächliche Länge 250 mm}$$

Für URg 33:

$$m := 115 \text{ g}$$

$$V_{\text{Beschichtung}} := \frac{m}{\rho} = 4,26 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$A_{\text{Beschichtung}} := \frac{V_{\text{Beschichtung}}}{300 \text{ } \mu\text{m}} = 1419,75 \text{ cm}^2$$

$$b := 85 \text{ mm}$$

$$L_{\text{Beschichtung}} := \frac{A_{\text{Beschichtung}}}{b} = 1670,3 \text{ mm}$$

$$\frac{L_{\text{Beschichtung}}}{Verlustf} = 635,09 \text{ mm} \quad \text{->erscheint sehr hoch, tatsächliche Länge 280 mm}$$

Kostengegenrechnung AISi

Für URg 57:

$$Kosten_{URg57} := \frac{3,18 \text{ €}}{0,08 \text{ kg}} = 39,75 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$$

Für URg 33:

$$Kosten_{URg33} := \frac{4,58 \text{ €}}{0,115 \text{ kg}} = 39,8261 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$$

Aus E-Mailkorrespondenz mit Frau Dassler ergibt sich, dass der Kilopreis 39,79 € beträgt.

## Kostenberechnung für URg 57:

Durch Beschichtung zusätzlich entstehende Kosten (Aus SAP Logon 770 - System und Experteninterview entnommen):

Benennung und Grundmodell der Berechnung nach: Tabellenbuch für Metalltechnik 4. Auflage ISBN 3.582.03291.4 Seite 223

Fertigungslohnkosten:  $FLK := 32,89 \text{ €}$

Materialeinzelkosten:  $MEK := 3,18 \text{ €}$

Gemeinkostenfaktor Fertigung:  $FGK := 62,38 \%$

Gemeinkostenfaktor für Material:  $MGK := 6,43 \%$

Gemeinkosten Material:  $GMKZ_M := MEK \cdot MGK$

Gemeinkosten Fertigung:  $GMKZ_F := FLK \cdot FGK$

gewünschte Reduktion der Kosten für die Beschichtung (in Prozent):  $RKB_P := 10$

Gesamtkosten um die die Schicht reduziert werden muss:

$$\text{reduzierte\_Kosten} := (FLK + MEK + GMKZ_M + GMKZ_F) \cdot RKB_P = 5,68 \text{ €}$$

Auf wie viel Prozent die Beschichtungsmaterialkosten gesenkt werden müssten:

$$Ks_P := \frac{\left( \frac{100 - RKB_P}{100} \right) \cdot (FLK + MEK + GMKZ_M + GMKZ_F) - (FLK + GMKZ_F)}{(1 + MGK) \cdot MEK} = -67,8 \%$$

$$\text{Kontrollrechnung: } \frac{FLK + GMKZ_F + (1 + MGK) \cdot MEK \cdot Ks_P}{FLK + MEK + GMKZ_M + GMKZ_F} = 0,9$$

Materialkosten die pro Gleitstuhl maximal ausgegeben werden dürfen:

$$MK_{\text{neu,max}} := MEK \cdot Ks_P \cdot (1 + MGK) = -2,29 \text{ €}$$

Kontrollrechnungen:

$$\frac{FLK + GMKZ_F + MK_{\text{neu,max}}}{FLK + MEK + GMKZ_M + GMKZ_F} = 0,9$$

$$MEK + GMKZ_M - MK_{\text{neu,max}} = 5,6791 \text{ €}$$

Auf wie viel Prozent wie viel die Fertigungskosten gesenkt werden müssten:

$$Ks_F := \frac{\left( \frac{100 - RKB_P}{100} \right) \cdot (FLK + MEK + GMKZ_M + GMKZ_F) - (MEK + GMKZ_M)}{(1 + FGK) \cdot FLK} = 89,37 \%$$

$$\text{Kontrollrechnung: } \frac{MEK + GMKZ_M + (1 + FGK) \cdot FLK \cdot Ks_F}{FLK + MEK + GMKZ_M + GMKZ_F} = 0,9$$

Fertigungskosten die pro Gleitstuhl maximal ausgegeben werden dürfen:

$$FK_{\text{neu,max}} := FLK \cdot Ks_F \cdot (1 + FGK) = 47,73 \text{ €}$$

Kontrollrechnungen:

$$\frac{MEK + GMKZ_M + FK_{\text{neu,max}}}{FLK + MEK + GMKZ_M + GMKZ_F} = 0,9$$

$$FLK + GMKZ_F - FK_{\text{neu,max}} = 5,68 \text{ €}$$

## Kostenberechnung für URg 33:

**Durch Beschichtung zusätzlich entstehende Kosten (Aus SAP Logon 770 - System und Experteninterview entnommen):**

Benennung und Grundmodell der Berechnung nach: Tabellenbuch für Metalltechnik 4. Auflage ISBN 3.582.03291.4 Seite 223

Fertigungslohnkosten:  $FLK := 17,05 \text{ €}$

Materialeinzelkosten:  $MEK := 4,58 \text{ €}$

Gemeinkostenfaktor Fertigung:  $FGK := 62,38 \%$

Gemeinkostenfaktor für Material:  $MGK := 6,43 \%$

Gemeinkosten Material:  $GMKZ_M := MEK \cdot MGK = 0,29 \text{ €}$

Gemeinkosten Fertigung:  $GMKZ_F := FLK \cdot FGK = 10,64 \text{ €}$

gewünschte Reduktion der Kosten für die Beschichtung (in Prozent):  $RKB_p := 10$

Gesamtkosten um die die Schicht reduziert werden muss:

$$\text{reduzierte\_Kosten} := (FLK + MEK + GMKZ_M + GMKZ_F) \cdot RKB_p = 3,26 \text{ €}$$

Auf wie viel Prozent die Beschichtungsmaterialkosten gesenkt werden müssten:

$$Ks_p := \frac{\left( \frac{100 - RKB_p}{100} \right) \cdot (FLK + MEK + GMKZ_M + GMKZ_F) - (FLK + GMKZ_F)}{(1 + MGK) \cdot MEK} = 33,2 \%$$

Materialkosten die pro Gleitstuhl maximal ausgegeben werden dürfen:

$$MK_{\text{neu,max}} := MEK \cdot Ks_p \cdot (1 + MGK) = 1,62 \text{ €}$$

Kontrollrechnungen:

$$\frac{FLK + GMKZ_F + MK_{\text{neu,max}}}{FLK + MEK + GMKZ_M + GMKZ_F} = 0,9$$

$$MEK + GMKZ_M - MK_{\text{neu,max}} = 3,26 \text{ €}$$

Auf wie viel Prozent wie viel die Fertigungskosten gesenkt werden müssten:

$$Ks_F := \frac{\left( \frac{100 - RKB_p}{100} \right) \cdot (FLK + MEK + GMKZ_M + GMKZ_F) - (MEK + GMKZ_M)}{(1 + FGK) \cdot FLK} = 88,24 \%$$

$$\text{Kontrollrechnung: } \frac{MEK + GMKZ_M + (1 + FGK) \cdot FLK \cdot Ks_F}{FLK + MEK + GMKZ_M + GMKZ_F} = 0,9$$

Fertigungskosten die pro Gleitstuhl maximal ausgegeben werden dürfen:

$$FK_{\text{neu,max}} := FLK \cdot Ks_F \cdot (1 + FGK) = 24,43 \text{ €}$$

Kontrollrechnungen:

$$\frac{MEK + GMKZ_M + FK_{\text{neu,max}}}{FLK + MEK + GMKZ_M + GMKZ_F} = 0,9$$

$$FLK + GMKZ_F - FK_{\text{neu,max}} = 3,26 \text{ €}$$

## Berechnung der Soll-Fertigungslohnkosten für URg 57:

Durch IST-Beschichtung zusätzlich entstehende Kosten (Aus SAP Logon 770 - System und Experteninterview entnommen):

Benennung und Grundmodell der Berechnung nach: Tabellenbuch für Metalltechnik 4. Auflage ISBN 3.582.03291.4 Seite 223

$$\text{Materialkosten pro Liter (Klügertrop TP 47-391): } MEK_{\text{Liter}} := \frac{2563,29 \text{ €} + 154,53 \text{ €}}{18 \text{ l}} = 150,99 \frac{\text{€}}{\text{l}}$$

$$\text{Zu beschichtende Fläche: } A := 250 \text{ mm} \cdot 170 \text{ mm} = 425 \text{ cm}^2$$

$$\text{Gewünschte Schichtdicke: } s := 100 \text{ μm}$$

$$\text{Verlustfaktor: } Verlustf := 1,6$$

$$\text{Schichtvolumen: } V := A \cdot s \cdot Verlustf = 6,8 \text{ cm}^3$$

$$\text{Materialeinzelkosten SOLL: } MEK_{\text{soll}} := V \cdot MEK_{\text{Liter}} = 1,03 \text{ €}$$

$$\text{Fertigungslohnkosten: } FLK_{\text{ist}} := 32,89 \text{ €}$$

$$\text{Materialeinzelkosten: } MEK_{\text{ist}} := 3,18 \text{ €}$$

$$\text{Gemeinkostenfaktor Fertigung: } FGK := 62,38 \%$$

$$\text{Gemeinkostenfaktor für Material: } MGK := 6,43 \%$$

$$\text{Gemeinkosten Material: } GMKZ_M := MEK_{\text{ist}} \cdot MGK = 0,2 \text{ €}$$

$$\text{Gemeinkosten Fertigung: } GMKZ_F := FLK_{\text{ist}} \cdot FGK = 20,52 \text{ €}$$

$$\text{Herstellkosten IST: } HK_{\text{ist}} := FLK_{\text{ist}} + MEK_{\text{ist}} + GMKZ_M + GMKZ_F = 56,79 \text{ €}$$

$$\text{gewünschte Reduktion der Kosten für die Beschichtung (in Prozent): } RKB_p := 10$$

$$\text{Herstellkosten SOLL: } HK_{\text{soll}} := (FLK_{\text{ist}} + MEK_{\text{ist}} + GMKZ_M + GMKZ_F) \cdot 0,9 = 51,11 \text{ €}$$

$$\text{Fertigungslohnkosten SOLL: } FLK_{\text{soll}} := \frac{HK_{\text{soll}} - (MEK_{\text{soll}} \cdot (1 + MGK))}{1 + FGK} = 30,8 \text{ €}$$

Kontrollrechnungen:

$$FLK_{\text{soll}} \cdot (1 + FGK) + MEK_{\text{soll}} \cdot (1 + MGK) = 51,11 \text{ €}$$

$$\frac{FLK_{\text{soll}} \cdot (1 + FGK) + MEK_{\text{soll}} \cdot (1 + MGK)}{HK_{\text{soll}}} = 1$$

Auf wie viel Prozent die Herstellkosten bei neuem Beschichtungsmaterial reduziert werden müssen, damit 10 % Kosten eingespart werden:

$$\frac{FLK_{\text{soll}}}{FLK_{\text{ist}}} = 93,66 \%$$

## Berechnung der Soll-Fertigungslohnkosten für URg 33:

**Durch IST-Beschichtung zusätzlich entstehende Kosten (Aus SAP Logon 770 - System und Experteninterview entnommen):**

Benennung und Grundmodell der Berechnung nach: Tabellenbuch für Metalltechnik 4. Auflage ISBN 3.582.03291.4 Seite 223

Zu beschichtende Fläche:  $A := 260 \text{ mm} \cdot 70 \text{ mm} = 182 \text{ cm}^2$

Gewünschte Schichtdicke:  $s := 100 \text{ } \mu\text{m}$

Verlustfaktor:  $Verlustf := 1,6$

Schichtvolumen:  $V := A \cdot s \cdot Verlustf = 2,91 \text{ cm}^3$

Materialeinzelkosten SOLL:  $MEK_{soll} := V \cdot MEK_{Liter} = 0,44 \text{ €}$

Fertigungslohnkosten:  $FLK_{ist} := 17,05 \text{ €}$

Materialeinzelkosten:  $MEK_{ist} := 4,58 \text{ €}$

Gemeinkostenfaktor Fertigung:  $FGK := 62,38 \%$

Gemeinkostenfaktor für Material:  $MGK := 6,43 \%$

Gemeinkosten Material:  $GMKZ_M := MEK_{ist} \cdot MGK = 0,29 \text{ €}$

Gemeinkosten Fertigung:  $GMKZ_F := FLK_{ist} \cdot FGK = 10,64 \text{ €}$

Herstellkosten IST:  $HK_{ist} := FLK_{ist} + MEK_{ist} + GMKZ_M + GMKZ_F = 32,56 \text{ €}$

gewünschte Reduktion der Kosten für die Beschichtung (in Prozent):  $RKB_p := 10$

Herstellkosten SOLL:  $HK_{soll} := (FLK_{ist} + MEK_{ist} + GMKZ_M + GMKZ_F) \cdot 0,9 = 29,3 \text{ €}$

Fertigungslohnkosten SOLL:  $FLK_{soll} := \frac{HK_{soll} - (MEK_{soll} \cdot (1 + MGK))}{1 + FGK} = 17,76 \text{ €}$

Kontrollrechnungen:

$$FLK_{soll} \cdot (1 + FGK) + MEK_{soll} \cdot (1 + MGK) = 29,3 \text{ €}$$

$$\frac{FLK_{soll} \cdot (1 + FGK) + MEK_{soll} \cdot (1 + MGK)}{HK_{soll}} = 1$$

Auf wie viel Prozent die Herstellkosten bei neuem Beschichtungsmaterial reduziert werden müssen, damit 10 % Kosten eingespart werden:

$$\frac{FLK_{soll}}{FLK_{ist}} = 104,16 \%$$