



# Diplomarbeit

## Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

**Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Klaus Hoffmann**

Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik  
Forschungsbereich Konstruktionslehre und Fördertechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

**Günther Tobolka**

**Matrikelnummer 0126058**

**Große Stadtgutgasse 21/12**

**1020 Wien**

Wien, November 2015

---

Vorname, Nachname

### Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

---

Datum, Ort

---

Unterschrift

# Danksagung

Die vorliegende Diplomarbeit entstand am Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik der TU Wien in Zusammenarbeit mit der Firma Knorr-Bremse GmbH, Mödling.

Mein herzlicher Dank gilt

Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Klaus Hoffmann  
für die Betreuung von Seiten des Instituts

und

Herrn Dipl.-Ing. Dr. Georg Krismanic  
für die Unterstützung bei der Firma Knorr-Bremse GmbH.

Außerdem bedanke ich mich ganz besonders bei meiner Freundin, die mir in schwierigen Zeiten stets zur Seite gestanden ist.

Ich widme diese Arbeit meinen Eltern, die mich während meines gesamten Studiums bestmöglich unterstützt haben.

# Kurzzusammenfassung

In Schienenfahrzeugen werden zur Erhöhung der Reibung zwischen Rad und Schiene Sandungssysteme eingesetzt. Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Konstruktion und Fertigung der Sandbehälter im Fahrzeug, welche bisher als Schweißkonstruktionen ausgeführt werden. Es wird untersucht, ob es ein geeignetes Kunststoffverarbeitungsverfahren gibt, das Kostenvorteile gegenüber den Schweißkonstruktionen aufweist.

Zuerst erfolgt eine Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise von Sandungssystemen. Anschließend werden allgemeine Anforderungen und Konstruktionsvorgaben für Sandkästen aufgezeigt. Es folgt die Vorstellung von zwei konkreten Projekten – ein Schnellbahn- und ein Straßenbahnprojekt –, auf die sich die weiteren Überlegungen beziehen.

Danach werden verschiedene Kunststoffverarbeitungsverfahren vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung zur Herstellung von Sandbehältern bewertet. Abschließend werden Konzepte der zwei am besten geeigneten Verfahren zu den beiden Projekten erstellt und eine Kostenabschätzung durchgeführt.

Das Rotationsformverfahren stellt sich bei entsprechenden Stückzahlen als kostengünstigste Möglichkeit zur Herstellung von Sandkästen heraus. Die erstmalige Umsetzung und Bestätigung dieses Konzeptes erfordert eine einmalige Investition in ein Werkzeug, um einen Prototypen herstellen und die mechanische Prüfung nach EN 61373 durchführen zu können.

# Abstract

In rail vehicles, sanding systems are used to increase friction between the wheels of the vehicle and the rail. The subject of this thesis is the design and production of sandboxes used in these sanding systems. A current state-of-the-art sandbox is a welded construction. The research issue here is whether there are polymer processing methods which are suitable for sandbox construction and also result in a cost benefit when compared to welded constructions.

After a description of the structure and functionality of sanding systems, general requirements and design specifications for sandboxes are discussed. Following this two specific projects are presented (one regional-railway- and one tramway-project), on which all further considerations here are based.

In the next section several polymer processing methods are introduced and assessed as to their suitability for sandbox manufacturing. The two most suitable methods are then used for creating concepts (including cost estimates) for the aforementioned two projects.

In conclusion, rotational moulding emerges as the most cost effective method (based on sufficient quantities) for sandbox production. The first implementation (and with it the confirmation) of this concept necessitates a one-time investment in a mould to enable the production of a prototype and mechanical testing according to EN 61373.

# I. Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Einführung Sandungssysteme .....	3
2.1	Begriffsdefinitionen .....	3
2.2	Auswirkung der Sandung auf den Haftwert .....	4
2.3	Anwendung der Sandungssysteme .....	6
2.3.1	Verteilung der Sandungssysteme im Zugverband.....	6
2.3.2	Ansteuerung der Sandungssysteme.....	7
2.4	Aufbau eines Sandungssystems.....	8
2.4.1	Sandkasten .....	9
2.4.2	Sandungsanlage.....	12
2.4.3	Druckluftversorgung.....	12
2.4.4	Befüllung.....	13
2.4.5	Sandstandsanzeige .....	13
2.4.6	Sandschlauch/-rohr und Sandrohrheizung .....	14
2.4.7	Aufbau des Gesamtsystems .....	15
2.5	Funktion von Sandungsanlagen.....	16
2.5.1	Überdruckprinzip.....	17
2.5.2	Unterdruckprinzip .....	19
2.5.3	Kombiniertes Überdruck-/Unterdruckprinzip.....	21
2.5.4	Zellenradprinzip.....	23
2.6	Funktion der Befüllungsanlagen .....	25
3	Anforderungen an Sandkästen.....	28
3.1	Normen und Standards.....	28
3.2	EN 61373: Prüfungen für Schwingen und Schocken .....	29
3.3	Konstruktionsvorgaben für Sandungssysteme .....	33
3.4	Material .....	38
4	Vorstellung der Projekte .....	40
4.1	Das Schnellbahnprojekt .....	40
4.1.1	Grundlagen des Sandungssystems .....	41
4.1.2	Mechanische Konstruktion.....	41
4.2	Das Straßenbahnprojekt.....	45
4.2.1	Grundlagen des Sandungssystems .....	45
4.2.2	Mechanische Konstruktion.....	46
5	Fertigungsverfahren .....	50
5.1	Stand der Technik .....	51
5.1.1	Schweißkonstruktion aus Stahl- oder Aluminiumblechen .....	51
5.1.2	Kunststoffbehälter nach Patent SIEMENS.....	53

5.2	Spritzgießen .....	55
5.2.1	Fertigungsprozess.....	55
5.2.2	Werkzeuge.....	56
5.2.3	Fazit .....	57
5.3	Pressen (inkl. SMC, GMT) .....	58
5.3.1	Fertigungsprozess.....	58
5.3.2	Werkzeuge.....	60
5.3.3	Fazit .....	60
5.4	Extrusionsblasformen .....	60
5.4.1	Fertigungsprozess.....	61
5.4.2	Werkzeuge.....	62
5.4.3	Fazit .....	63
5.5	Rotationsformen.....	63
5.5.1	Fertigungsprozess.....	64
5.5.2	Werkzeuge.....	66
5.5.3	Fazit .....	66
5.6	Faserverstärkte Kunststoffe .....	67
5.6.1	Materialien für FVK .....	68
5.6.2	Handlaminieren .....	69
5.6.3	Faserharzspritzen .....	70
5.6.4	Injektionsverfahren (RTM) .....	71
5.6.5	Fazit .....	73
5.7	Zusammenfassung und Vorauswahl.....	73
6	Vorstellung und Bewertung der Konzepte .....	75
6.1	Schweißkonstruktion aus Metall .....	75
6.1.1	Schnellbahnprojekt.....	75
6.1.2	Straßenbahnprojekt.....	81
6.2	Rotationsformen .....	85
6.2.1	Schnellbahnprojekt.....	87
6.2.2	Straßenbahnprojekt.....	91
6.3	Faserverstärkte Kunststoffe.....	94
6.3.1	Schnellbahnprojekt.....	94
6.3.2	Straßenbahnprojekt.....	99
7	Fazit und Ausblick.....	105
8	Exkurs: Konstruktion eines Prototypen einer Sandungsanlage.....	107
9	Literaturverzeichnis.....	109

## II. Abbildungsverzeichnis

Alle technischen Zeichnungen sind im Originalformat A3 und im Format A4 in die Arbeit eingebunden.

Abbildung 1: Wirkung der Sandung .....	6
Abbildung 2: Anordnung der Sandungssysteme bei einem konventionellen Fahrwerk.....	7
Abbildung 3: Allgemeines Schema eines Sandungssystems .....	8
Abbildung 4: Sandkasten mit Nebenkompenten .....	9
Abbildung 5: Auswirkung der Gestalt des Trichters auf das Volumen.....	10
Abbildung 6: Vergleich runder und eckiger Trichter .....	11
Abbildung 7: Sandungsanlage SDN14, Knorr-Bremse GmbH.....	12
Abbildung 8: Sandstandsanzeige.....	14
Abbildung 9: Sandrohrheizung .....	15
Abbildung 10: Allgemeines Aufbauschema eines kompletten Sandungssystems.....	16
Abbildung 11: Schema einer Sandungsanlage nach dem Überdruckprinzip .....	18
Abbildung 12: Diagramm Fördermenge, Druck, Körnung; Sandungsanlage SDN14.....	19
Abbildung 13: Schema einer Sandungsanlage nach dem Unterdruckprinzip.....	20
Abbildung 14: Schema einer Sandungsanlage nach dem kombinierten Über- /Unterdruckprinzip .....	22
Abbildung 15: Sandungsanlage nach dem Zellenradprinzip der Firma Nowe GmbH.....	24
Abbildung 16: Beispiele mobiler Befüllungsanlagen von 12 bis 500 Liter Sandvolumen .....	25
Abbildung 17: Schematische Darstellung einer stationären Befüllungsanlage .....	26
Abbildung 18: Beispiel für Ausführung und Positionierung des Befüllstutzens.....	27
Abbildung 19: Prüfbedingungen für Funktionsprüfung und Lebensdauerprüfung .....	32
Abbildung 20: Prüfbedingungen für Schockprüfung.....	33
Abbildung 21: Anordnung der Sandkästen, Schnellbahnprojekt.....	40
Abbildung 22: Platzierung der Sandungsanlage bei den Achsen 3,4,7 und 8.....	42
Abbildung 23: Platzierung der Sandungsanlage bei den Achsen 2 und 9 .....	42
Abbildung 24: Sitzkonstruktion bevor/nach Einbau des Sandungssystems .....	43
Abbildung 25: Projekt Schnellbahn - Einbauraum mit Anschlusspunkten.....	44
Abbildung 26: Anordnung der Sandkästen, Straßenbahnprojekt Kurzversion .....	45
Abbildung 27: Triebfahrwerk für das Straßenbahnprojekt.....	46
Abbildung 28: Platzierung der Sandungsanlagen beim Straßenbahnprojekt .....	47

Abbildung 29: Projekt Straßenbahn, Einbauraum .....	48
Abbildung 30: Schweißkonstruktion, Einzelteile und Zusammenbau.....	52
Abbildung 31: Sandkasten nach Patent SIEMENS, Auszug aus der Patentschrift.....	54
Abbildung 32: Schema des Spritzgießens.....	56
Abbildung 33: Schema des Pressverfahrens .....	59
Abbildung 34: Schema des Extrusionsblasformens .....	62
Abbildung 35: Schema des Rotationsformens .....	65
Abbildung 36: Schema des Handlaminierens.....	69
Abbildung 37: Schema des Faserharzpritzens.....	71
Abbildung 38: Schema des RTM-Verfahrens.....	72
Abbildung 39: Projekt Schnellbahn, Schweißkonstruktion, Foto eines Prototypen .....	76
Abbildung 40: Projekt Schnellbahn, Schweißkonstruktion, Einzelteile .....	78
Abbildung 41: Projekt Schnellbahn, Schweißkonstruktion 3D-Schnitt.....	79
Abbildung 42: Projekt Schnellbahn, Aufbau der Schweißkonstruktion .....	80
Abbildung 43: Projekt Schnellbahn, Schweißkonstruktion mit Außenabmessungen .....	80
Abbildung 44: Projekt Schnellbahn, Schweißkonstruktion, Trichter.....	80
Abbildung 45: Projekt Straßenbahn, Schweißkonstruktion, Einzelteile.....	82
Abbildung 46: Projekt Straßenbahn, Schweißkonstruktion 3D-Schnitt .....	83
Abbildung 47: Projekt Straßenbahn, Schweißkonstruktion mit Außenabmessungen .....	84
Abbildung 48: Projekt Straßenbahn, Schweißkonstruktion, Blechteile 1 und 2 .....	84
Abbildung 49: Gesamtkosten pro Stück in Abhängigkeit von der Stückzahl und den Werkzeugkosten.....	87
Abbildung 50: Projekt Schnellbahn, Rotationskonstruktion, Einzelteile .....	88
Abbildung 51: Projekt Schnellbahn, Rotationskonstruktion 3D-Schnitt .....	89
Abbildung 52: Projekt Schnellbahn, Rotationskonstruktion mit Außenabmessungen .....	90
Abbildung 53: Projekt Schnellbahn, Rotationskonstruktion, Kasten .....	90
Abbildung 54: Projekt Straßenbahn, Rotationskonstruktion, Einzelteile.....	91
Abbildung 55: Projekt Straßenbahn, Rotationskonstruktion 3D-Schnitt .....	92
Abbildung 56: Projekt Straßenbahn, Rotationskonstruktion mit Außenabmessungen .....	93
Abbildung 57: Projekt Straßenbahn, Rotationskonstruktion, Kasten mit Grundplatte .....	93
Abbildung 58: Projekt Schnellbahn, GFK-Konstruktion, Einzelteile .....	96
Abbildung 59: Projekt Schnellbahn, GFK-Konstruktion 3D-Schnitt .....	97
Abbildung 60: Projekt Schnellbahn, GFK-Konstruktion mit Außenabmessungen.....	98

Abbildung 61: Projekt Schnellbahn, GFK-Konstruktion, Kasten mit Trichter und Rahmen für Einfüllklappe.....	98
Abbildung 62: Projekt Straßenbahn, GFK-Konstruktion Var.1, Einzelteile.....	99
Abbildung 63: Projekt Straßenbahn, GFK-Konstruktion Var.1 3D-Schnitt .....	100
Abbildung 64: Projekt Straßenbahn, GFK-Konstruktion Var.1 mit Außenabmessungen .....	101
Abbildung 65: Projekt Straßenbahn, GFK-Konstruktion Var.1, Ober- und Unterteil .....	101
Abbildung 66: Projekt Straßenbahn, GFK-Konstruktion Var.2, Einzelteile.....	102
Abbildung 67: Projekt Straßenbahn, GFK-Konstruktion Var.2 3D-Schnitt .....	103
Abbildung 68: Projekt Straßenbahn, GFK-Konstruktion Var.2 mit Außenabmessungen .....	104
Abbildung 69: Projekt Straßenbahn, GFK-Konstruktion Var.2, Ober- und Unterteil mit Grundplatte.....	104
Abbildung 70: Gesamtkosten pro Stück für Rotationsformen und Schweißkonstruktion .....	105
Abbildung 71: Sandungsanlage Var. 1, Einzelteil .....	108
Abbildung 72: Sandungsanlage Var. 1, Baugruppe .....	108
Abbildung 73: Sandungsanlage Var. 2, Einzelteil .....	108
Abbildung 74: Sandungsanlage Var. 2, Baugruppe .....	108

### **III. Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Typische Haftwerte bei unterschiedlichen Verhältnissen .....	5
Tabelle 2: Legende zu Abbildung 10.....	16
Tabelle 3: Vor- und Nachteile der Schweißkonstruktion .....	52
Tabelle 4: Beispiele für Reaktionsharze, Füll- und Verstärkungsstoffe .....	68
Tabelle 5: Übersicht über Fertigungsverfahren .....	74
Tabelle 6: Übersicht haasmetal Design .....	75
Tabelle 7: Angaben der Firma haasmetal Design zur Kostenabschätzung .....	76
Tabelle 8: Berechnungen zur Kostenabschätzung .....	76
Tabelle 9: Kostenabschätzung Schweißkonstruktion.....	77
Tabelle 10: Übersicht Promens Hockenheim GmbH.....	85
Tabelle 11: Informationen von Promens Hockenheim GmbH.....	86
Tabelle 12:Übersicht GFK Center GmbH .....	94
Tabelle 13: Angebot der Firma GFK Center.....	95

## IV. Abkürzungsverzeichnis

BOStrab	Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen
EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung
RTM	Resin Transfer Moulding
SMC	Sheet moulding compound
GMT	Glasfaserplattenverstärkter Thermoplast
PE	Polyethylen
PVC	Polyvinylchlorid
FVK	faserverstärkter Kunststoff
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff

# 1 Einleitung

Seit den Anfängen des Eisenbahnwesens entsteht die Kraft zum Antreiben und Bremsen der Züge durch Reibschluss zwischen Rad und Schiene. Die größtmögliche Kraft, die von einem Rad auf die Schiene übertragen werden kann, entspricht dem Produkt aus Radlast und Reibbeiwert. Der Reibbeiwert ist abhängig von den Umgebungsbedingungen und dem Zustand von Rad und Schiene. Bei ungünstigen Verhältnissen ist der Reibwert zu niedrig, um die gewünschte Zug- oder Bremskraft übertragen zu können. Da solche Bedingungen oft im Herbst auftreten, werden die daraus resultierenden Probleme als sogenanntes „Herbstproblem“ bezeichnet (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 10).

Um bei Bedarf den Kraftschluss zwischen Rad und Schiene zu erhöhen, werden in Schienenfahrzeugen Sandungssysteme eingesetzt. Durch direkte Einbringung von Sand in den Spalt zwischen Rad und Schiene wird der Reibbeiwert erhöht und die Schiene „griffiger“ gemacht. Somit wird ein problemloses Anfahren und Beschleunigen bei allen Witterungsbedingungen sowie eine Verkürzung der Anhaltewege ermöglicht.

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit **der Konstruktion und der Fertigung von Sandbehältern** für Sandungssysteme. Diese Behälter sind Teil eines Sandungssystems, dienen zur Lagerung des Sandes im Schienenfahrzeug während des Betriebs und werden als Sandkästen oder Sandbehälter bezeichnet. Bisher werden die Sandkästen als Schweißkonstruktionen aus Stahl- oder Aluminiumblechen ausgeführt. Aufgrund der komplizierten geometrischen Formen und der meist geringen Stückzahlen ist die Fertigung aufwändig und kann kaum automatisiert werden.

Das Ziel der Arbeit ist es, ein **alternatives Fertigungsverfahren** für die Herstellung von Sandbehältern zu finden, das den Anforderungen im Bahnbetrieb gerecht wird und Kostenvorteile gegenüber den Schweißkonstruktionen aufweist. Dabei soll der **Sandkasten aus Kunststoff** bestehen.

Bei der Konstruktion der Sandbehälter sind einige Besonderheiten und spezielle Anforderungen zu beachten, die sich durch den Betrieb in einem Schienenfahrzeug ergeben. Dazu zählen z.B. die mechanische Belastung durch Schwingungen und Stöße, hohe geforderte Lebensdauer und Zuverlässigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Brandschutz. Außerdem sind die Fließeigenschaften des Sandes zu bedenken, die großen Einfluss auf die Geometrie der Sandbehälter haben.

Die Überlegungen beziehen sich auf zwei spezielle Projekte, bei denen sich die Sandkästen jeweils im Wagenkasten befinden. Das geforderte nutzbare Sandvolumen beträgt bei beiden

Projekten ca. 20 Liter, die Stückzahlen belaufen sich auf mind. 1.000 bis ca. 3.500 Stück je Projekt. Außerdem wird im Zuge der Arbeit ein Prototyp einer neuen, niedrigeren Sandungsanlage entwickelt. Die Sandungsanlage ist jene Komponente des Sandungssystems, die den Sand mittels Druckluft aus dem Behälter fördert.

Zunächst erfolgt in Kapitel 2 eine Einführung in das Thema und eine Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise von Sandungssystemen. Das Kapitel 3 beschreibt die Anforderungen an Sandkästen und allgemeine Konstruktionsvorgaben. Dabei werden Bedingungen aus Lastenheften verschiedener Projekte zu einem allgemein gültigen Lastenheft zusammengefasst. Im darauffolgenden Kapitel 4 werden die zwei in der Arbeit speziell behandelten Projekte vorgestellt.

In Kapitel 5 wird zunächst die bisher übliche Konstruktionsweise von Sandbehältern gezeigt und anschließend werden verschiedene Kunststoffverarbeitungsverfahren und deren zugehörige Werkstoffe vorgestellt, miteinander verglichen und in Bezug auf die Eignung für bahntaugliche Sandbehälter bewertet. Es erfolgt eine Vorauswahl von Fertigungsverfahren, die in Kapitel 6 weiter untersucht werden. Hier werden drei verschiedene Konzepte mit folgenden Fertigungsverfahren und Werkstoffen vorgestellt:

- herkömmliche Schweißkonstruktion (Edelstahl)
- Rotationsformen (Polyethylen)
- Handlaminieren (Glasfaserverstärkter Kunststoff)

Anhand dieser Konzepte wird eine grobe Kostenabschätzung durchgeführt und im Anschluss ein Konzept ausgewählt. Die Schlussfolgerungen und ein Ausblick folgen in Kapitel 7.

Das letzte Kapitel 8 beschreibt die Entwicklung des Prototyps der neuen Sandungsanlage, welche für die niedrigen Einbauräume bei den beiden Projekten benötigt wird.

**Anmerkung:** Die Diplomarbeit wurde im Zusammenhang mit einem Projekt der Firma Knorr-Bremse GmbH erstellt. Die meisten Unterlagen zu Sandungssystemen entstammen daher dem Fundus des Unternehmens. Die grundlegend beschriebenen Funktionsweisen von Sandungssystemen und deren Komponenten sind auch bei anderen Herstellern ähnlich. Eine Ausnahme bildet das Zellenradprinzip der Firma Nowe GmbH, welches in Kapitel 2.5.4 vorgestellt wird.

Eine weitere Vorgabe ist, dass die Sandbehälter nicht bei der Firma Knorr-Bremse hergestellt werden können, sondern von einem spezialisierten Fertigungsbetrieb zugeliefert werden, unabhängig vom gewählten Fertigungsverfahren und Material der Sandkästen. Dies ist für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu berücksichtigen.

## 2 Einführung Sandungssysteme

Dieses Kapitel dient einer allgemeinen Aufarbeitung des Themas Sandungssysteme. Zuerst werden einige wichtige Begriffe aus dem Schienenfahrzeugbau und speziell aus dem Bereich der Sandung definiert und erläutert. Dann wird auf das Haftwertverhalten zwischen Rad und Schiene eingegangen und der Einfluss der Sandung aufgezeigt. Es folgt eine Erklärung, wie Sandungssysteme in Schienenfahrzeugen angewendet und eingesetzt werden. Schließlich werden der Aufbau und die Funktionsweise von Sandungssystemen beschrieben. Es werden die einzelnen Komponenten vorgestellt, aus denen ein vollständiges Sandungssystem besteht, verschiedene Förderprinzipien von Sandungsanlagen erklärt und der Aufbau von Befüllungsanlagen beschrieben.

### 2.1 Begriffsdefinitionen

Die in weiterer Folge angeführten Definitionen entstammen nicht der Fachliteratur. Vielmehr handelt es sich um die Wiedergabe bzw. Festlegung begrifflicher Konventionen, um die in der Diplomarbeit verwendeten Begriffe eindeutig zu definieren. Der Wortlaut entspringt daher eher dem allgemein üblichen technischen Sprachgebrauch als der wissenschaftlichen Literatur.

**Sandungssystem** (auch: Sandstreusystem): Als Sandungssystem wird immer das Gesamtsystem je Rad bezeichnet. Dazu gehören sämtliche Komponenten, die für die vollständige Funktion der Sandung erforderlich sind.

**Sandungsanlage** (auch: Sandstreuanlage): Die Sandungsanlage ist jene Komponente des Sandungssystems, die mittels Druckluft den Sand aus dem Sandkasten heraus bis in den Rad-Schiene-Spalt fördert.

**Schleudern**: Als Schleudern bezeichnet man das Durchdrehen der Räder beim Anfahren oder Beschleunigen des Fahrzeugs.

**Gleiten**: Als Gleiten bezeichnet man das Blockieren der Räder beim Abbremsen des Fahrzeugs.

**Gleit- und Schleuderschutzsystem**: Der Gleit- und Schleuderschutz ist ein elektro-pneumatisches System, welches das Gleiten und Schleudern der Räder verhindert. Beim Blockieren der Räder wird automatisch der Druck in den Bremszylindern und somit die Bremskraft vermindert, bei Schleudern der Räder werden diese Räder abgebremst.

**Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge:** Einrichtungsfahrzeuge sind für den Betrieb in nur einer Fahrtrichtung bestimmt. Sie besitzen einen Führerstand und Einstiegstüren auf nur einer Seite. Dies ist meistens bei Straßenbahnen der Fall. Zweirichtungsfahrzeuge können in beide Fahrtrichtungen gleichermaßen betrieben werden. Sie besitzen Führerstände an beiden Enden des Fahrzeuges und Türen auf beiden Seiten. Dies ist z.B. bei U-Bahnen und Regionalbahnen der Fall.

**Konventionelles Fahrwerk** (siehe auch Abbildung 2): Fahrwerke von Schienenfahrzeugen bestehen meistens aus einem Rahmen (Drehgestell), in dem zwei Radsätze gelagert sind. Ein Radsatz besteht aus zwei Rädern, die durch eine Welle miteinander verbunden sind. Ein konventionelles Fahrwerk besitzt also zwei Achsen. Man unterscheidet zwischen Triebfahrwerken und Lauffahrwerken: Beim Triebfahrwerk werden beide Achsen angetrieben und gebremst, beim Lauffahrwerk werden die Achsen nicht angetrieben aber gebremst. Vereinzelt gibt es auch Fahrwerke, die nur eine Achse besitzen.

## 2.2 Auswirkung der Sandung auf den Haftwert

In diesem Abschnitt soll gezeigt werden, welchen Einfluss die Besandung auf den Reibwert zwischen Rad und Schiene ausübt. Der Reibwert ist bei trockener und sauberer Schiene am höchsten, bei solchen Zuständen rechnet man mit einem Wert von etwa 0,20. Bei extrem ungünstigen Bedingungen, wie z.B. Feuchtigkeit oder Verunreinigungen (z.B. Laub, Rückstände von Öl oder Industrieabgasen, etc.), kann dieser Wert bis etwa 0,05 herab sinken (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 23). Bei so geringen Reibwerten kommt es immer wieder zu Gleit- oder Schleuderschutzauslösungen. Das heißt die Bremskraft oder die Zugkraft muss reduziert werden, damit die Räder nicht zu gleiten oder schleudern beginnen. Dadurch verlängert sich der Bremsweg und das Anfahren sowie Beschleunigen des Zuges wird erschwert.

Das kann zu erheblichen Problemen im Eisenbahnbetrieb führen, nämlich:

- Der Zug erreicht seine planmäßige Fahrgeschwindigkeit zwischen den Stationen nicht, da das Beschleunigen länger dauert und die Bremsung auf Grund der längeren Bremswege früher eingeleitet werden muss. Also kann der Fahrplan nicht eingehalten werden und es kommt zu Verspätungen.
- Der Zug kann in der Station oder vor einem Signal nicht rechtzeitig angehalten werden. Das führt immer wieder zu gefährlichen Situationen.
- Langer Anhalteweg bei Notbremsungen
- In Extremfällen kann es sogar vorkommen, dass ein Zug auf einer Steigung gar nicht mehr anfahren kann (Knorr-Bremse GmbH, 2006, S. 6).

Es treten also immer wieder Situationen auf, in denen der gegebene Reibwert im Rad-Schiene-Kontakt nicht ausreicht, um die gewünschte Kraft zu übertragen. Sandungssysteme bieten nun die Möglichkeit, den Kraftschluss zwischen Rad und Schiene bei Bedarf zu erhöhen. Streusand wird durch diese Systeme direkt in den Spalt zwischen Rad und Schiene gebracht und dort niedergewalzt und zermahlen. Dadurch entstehen im Rad und in der Schiene sogenannte Sandnester, die eine Erhöhung des Kraftschlusses bewirken. Diese Sandnester sind so stabil, dass sie auch noch von den nachfolgenden Radsätzen genutzt werden können. Es muss also nicht jede Achse einzeln besandet werden (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 23).

Die Tabelle 1 zeigt typische Haftwerte für die besandete und unbesandete Schiene unter verschiedenen Verhältnissen. Durch die Sandung wird der Haftwert auf mindestens 0,35 erhöht. Bei extrem ungünstigen Verhältnissen mit einem ursprünglichen Reibwert von 0,05 kann der Wert sogar verzehnfacht werden.

	Haftwert $\mu$ ohne Sandung	Haftwert $\mu$ mit Sandung
trockene Schiene	0,20	0,35-0,70
Schiene nach starken Regenfällen (d.h. abgewaschenem Oxyd- und Schmierfilm)	0,15	0,40-0,60
Schiene bei extrem ungünstigen Witterungsbedingungen	0,05	0,40-0,50

Tabelle 1: Typische Haftwerte bei unterschiedlichen Verhältnissen

Quelle: (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 23)

Abbildung 1 veranschaulicht die Wirkung der Sandung beim Bremsvorgang. Es werden die Bremsverzögerung und der Bremszylinderdruck über der Zeit dargestellt. Die Zacken in beiden Kurven am Beginn der Bremsung (Zeitspanne A) zeigen, dass es immer wieder zu Gleitschutzauslösungen kommt. Der Bremszylinderdruck muss also verringert werden, um ein Blockieren der Räder zu verhindern. Das führt auch zu einer im Mittel niedrigeren Bremsverzögerung. Zum Zeitpunkt B gelangt der Sand zwischen Rad und Schiene und der Reibwert wird dadurch deutlich angehoben. Es sind keine Gleitschutzauslösungen mehr erforderlich und die Bremsverzögerung steigt auf den höchstmöglichen Wert an.

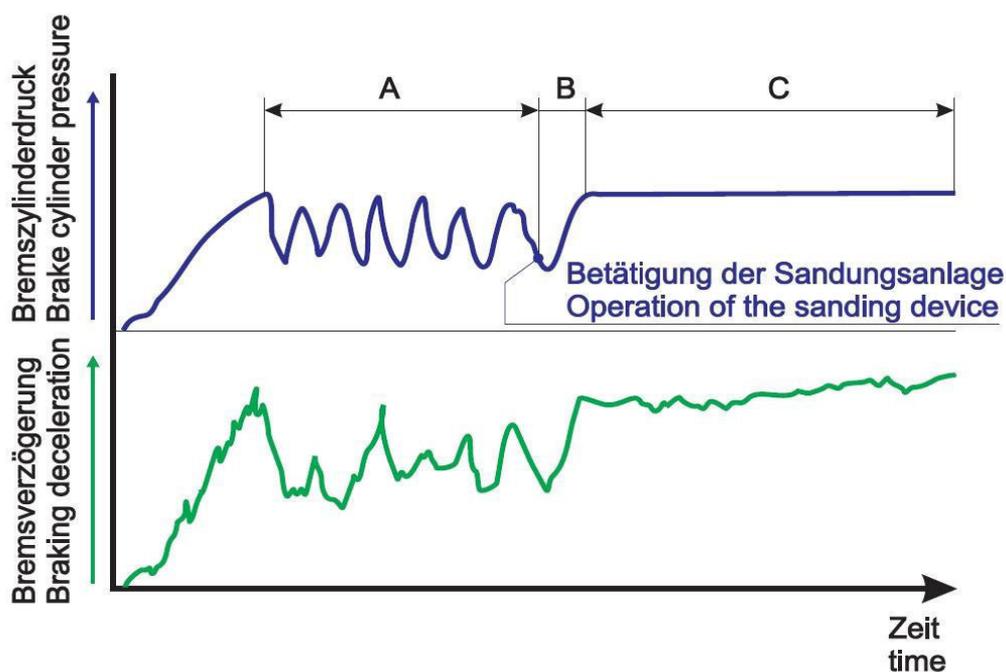


Abbildung 1: Wirkung der Sandung

Quelle: (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 22)

## 2.3 Anwendung der Sandungssysteme

Dieser Abschnitt beschreibt, wie Sandungssysteme in einem Schienenfahrzeug eingesetzt und angewendet werden. Es wird aufgezeigt, wo die Systeme im Fahrzeug positioniert werden, wie diese aktiviert werden und wie die Sandmengen reguliert werden.

### 2.3.1 Verteilung der Sandungssysteme im Zugverband

Sandungssysteme werden in allen Fahrzeugen verwendet, die für das Antreiben und Führen von Zügen vorgesehen sind. Dazu zählen vor allem:

- Lokomotiven
- Trieb- und Steuerwagen
- Straßenbahnen und U-Bahnen (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 19)

Die Anzahl und die Verteilung der einzelnen Sandungssysteme in einem Zugverband werden in Absprache mit dem Fahrzeugbetreiber und –hersteller bestimmt und sind von Fall zu Fall unterschiedlich. Es existieren bislang keine wissenschaftlichen Untersuchungen über die optimale Anzahl und Verteilung, daher stützt man sich auf Erfahrungswerte und Testfahrten mit dem jeweiligen Fahrzeug (Knorr-Bremse GmbH, 2006, S. 6).

Üblicherweise befinden sich Sandungssysteme nur bei den Triebfahrwerken, und selbst da wird meist nicht jede Achse besandet. Außerdem ist jede Sandstreuereinrichtung einer bestimmten Fahrtrichtung zugeordnet. Die Ansteuerung erfolgt so, dass immer der vorauslaufende Radsatz gesandet wird. Die Abbildung 2 zeigt schematisch ein Fahrwerk, bei dem beide Achsen besandet werden. Für eine Achse sind immer zwei Sandungssysteme erforderlich, sodass beide Räder besandet werden. Für die Fahrtrichtung A werden die Systeme 1 und 2 aktiviert, für die Fahrtrichtung B die Systeme 3 und 4.

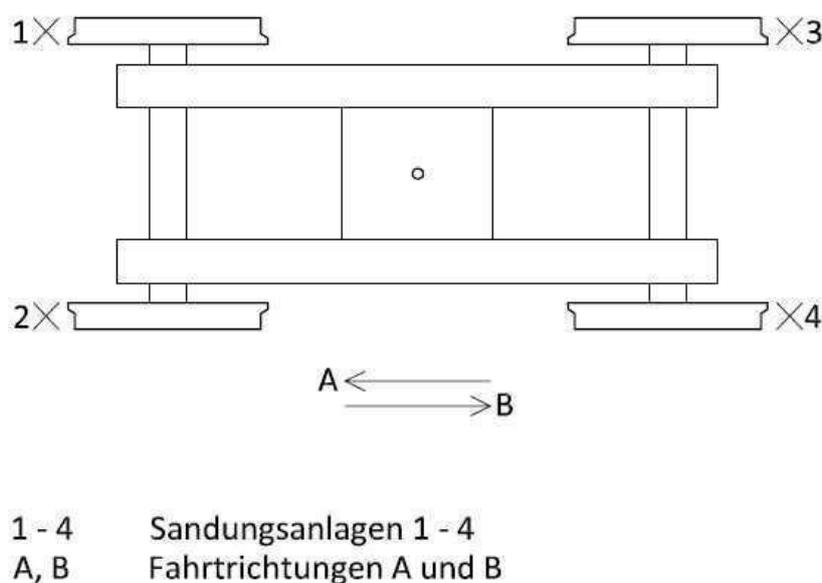


Abbildung 2: Anordnung der Sandungssysteme bei einem konventionellen Fahrwerk

Quelle: eigene Darstellung

### 2.3.2 Ansteuerung der Sandungssysteme

Die Sandung kann manuell oder automatisch ausgelöst werden. Für die manuelle Bedienung müssen entsprechende Schalter mit den Funktionen „kurzzeitiges Sanden“ und „Dauersanden“ in allen Führerräumen des Zugverbands vorhanden sein. In folgenden Fällen wird die Sandung automatisch aktiviert (Knorr-Bremse GmbH, 2007, S. 39):

- bei Gleit- und Schleuderschutzauslösungen
- wenn der Fahrschalter in maximaler Bremsstellung ist (Gefahrenbremse)
- bei Betätigung der Notbremse

Die Sandungsanlage fördert, je nach beaufschlagtem Druck, eine bestimmte Sandmenge pro Zeiteinheit, welche üblicherweise in g/30s angegeben wird. Versuche haben gezeigt, dass etwa 450 g/30s bei Light-Rail-Vehicles und 600 g/30s bei Vollbahnen eine sinnvolle Sandfördermenge darstellen. Früher förderten die Sandungssysteme immer eine konstante Sandmenge pro Zeiteinheit. Dadurch waren die Mengen bei höheren Geschwindigkeiten zu ge-

ring, um eine effiziente Wirkung zu erzielen. Bei niedrigen Geschwindigkeiten verursacht die gleiche Menge Probleme, da durch zu viel Sand die Signalstromkreise gestört werden können. Effizienter und wirtschaftlicher ist es daher, eine konstante Menge pro Längeneinheit auszubringen, angegeben in g/m. Dazu wird eine Steuerung benötigt, die je nach Geschwindigkeit den beaufschlagten Druck reguliert und so unterschiedliche Sandmengen (pro Zeiteinheit) ermöglicht. Moderne Sandungssysteme bewerkstelligen eine zumindest zweistufige geschwindigkeitsabhängige Sandmengensteuerung. Außerdem wird die Sandung bei niedrigen Geschwindigkeiten (ca. 5-10 km/h) abgeschaltet (Knorr-Bremse GmbH, 2007, S. 34).

## 2.4 Aufbau eines Sandungssystems

Abbildung 3 zeigt schematisch den Aufbau und die wichtigsten Komponenten eines Sandungssystems. Den größten und zentralen Teil des Systems stellt der Sandkasten dar (siehe Abbildung 4). Darin befindet sich während des Betriebs des Fahrzeugs der Sand, der bei Bedarf zwischen Rad und Schiene gestreut wird. Es wird grundsätzlich unterschieden zwischen Sandkästen, die direkt am Drehgestell im Freien angebracht sind, und Sandkästen, die sich im Inneren des Wagens befinden. Bei den beiden in dieser Arbeit behandelten Projekten befinden sich die Sandkästen im Inneren des Wagenkastens. In diesem Fall sind die mechanischen Belastungen und Umwelteinflüsse deutlich geringer als bei Sandkästen, die außen am Drehgestell montiert sind. In weiterer Folge werden nach den beiden Übersichtszeichnungen die Einzelkomponenten eines Sandungssystems im Detail vorgestellt.

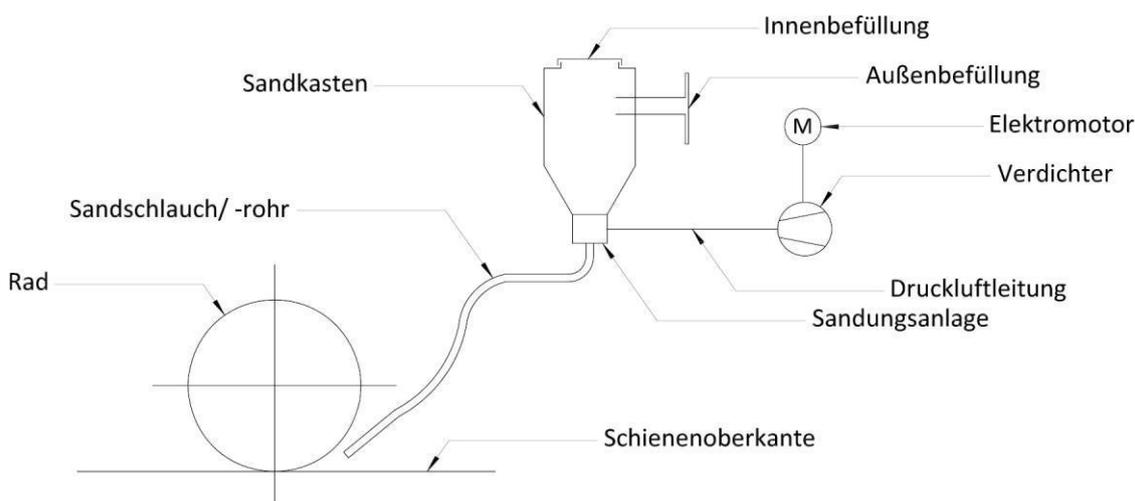


Abbildung 3: Allgemeines Schema eines Sandungssystems

Quelle: (Fischer, 2008, S. 5)

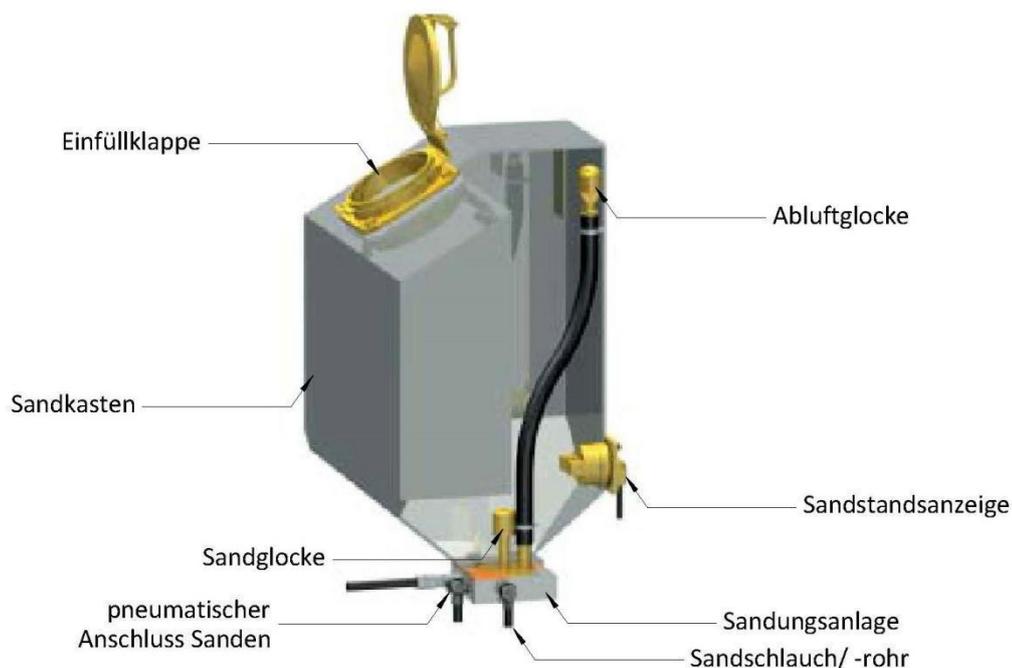


Abbildung 4: Sandkasten mit Nebenkomponenten

Quelle: (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 41)

### 2.4.1 Sandkasten

Die Form der Sandkästen wird einerseits durch den zur Verfügung stehenden Einbauraum und andererseits durch die Fließeigenschaften des Sandes bestimmt. Übliche Einbauräume innerhalb des Wagenkastens sind z.B. in der Seitenwandverkleidung, unterhalb der Sitze oder zwischen den Rückenlehnen der Sitze. Je nach vorgegebenem Einbauraum können unterschiedliche Ausführungen für die linke und rechte Seite erforderlich sein. Oft ist es schwierig, die Sandkästen in die bereits vorhandene Fahrzeuggeometrie zu integrieren und dabei das geforderte Mindestsandvolumen einzuhalten. Übliche Volumina von Sandkästen reichen von mindestens 15 Liter bei Light-Rail-Vehicles bis zu etwa 70 Liter bei modernen Lokomotiven.

Die Fließeigenschaften des Sandes bedingen außerdem, dass der Sandkasten nach unten - zur Sandungsanlage hin - trichterförmig gestaltet werden muss. Sonst würde sich in den Ecken ein Schüttkegel bilden und der Behälter könnte nicht vollständig entleert werden. Der Winkel des Trichters sollte im Idealfall etwa 35° betragen.

So ergeben sich teilweise recht komplizierte Geometrien. Außerdem müssen die Kästen oft druckdicht ausgeführt werden, je nach verwendeter Sandungsanlage. Dadurch werden die Konstruktion und die Fertigung von geschweißten Sandkästen sehr aufwändig. Aus dieser Problemstellung leitet sich die grundlegende Fragestellung dieser Forschungsarbeit ab, ob es

einen alternativen Fertigungsprozess gibt, der die Herstellung von Sandkästen vereinfacht und Kostenvorteile in Konstruktion und Fertigung bringt.

Im Folgenden werden die Auswirkungen der Gestaltung des Trichters auf das erreichbare Sandvolumen dargestellt. Die Ausgangslage bildet ein Sandkasten mit den Außenabmessungen 300x300x300 mm, die vier Befestigungspunkte der Sandungsanlage sollen einen Abstand von jeweils 70 mm aufweisen (siehe Abbildung 6). Bei den herkömmlichen Schweißkonstruktionen wird der Trichter fertigungsbedingt eckig mit vier Seitenflächen gebildet, bei den Kunststoffverarbeitungsverfahren kann der Trichter auf einfache Weise auch rund ausgeführt werden. Außerdem werden verschiedene Neigungswinkel des Trichters untersucht. Die Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen die unterschiedlichen Formen und die daraus resultierenden Volumina (in CAD-Programm berechnet). Daraus ist ersichtlich, dass bei gleichem nominellem Neigungswinkel der Unterschied zwischen rundem und eckigem Trichter sehr gering ist. Allerdings ist das tatsächliche Gefälle beim eckigen Trichter in den Ecken deutlich kleiner (in diesem Beispiel  $26,3^\circ$  statt  $35^\circ$ ), während es beim runden Trichter überall gleich bleibt. Also wird ein runder Trichter mit geringerer Neigung die gleichen Anforderungen erfüllen wie ein eckiger Trichter mit größerer Neigung. Daher ergeben sich Vorteile für den runden Trichter.

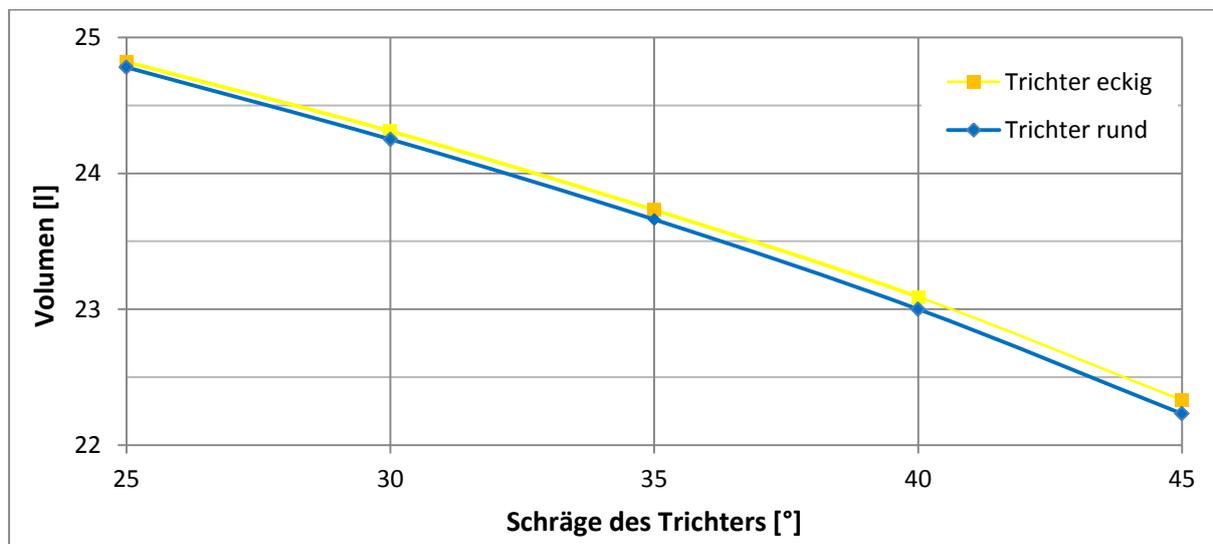
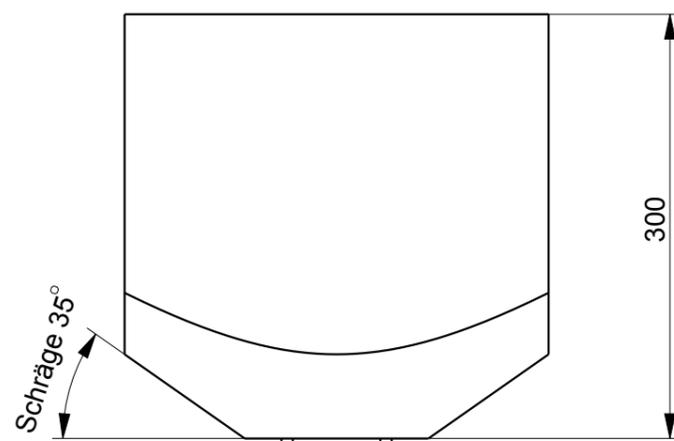
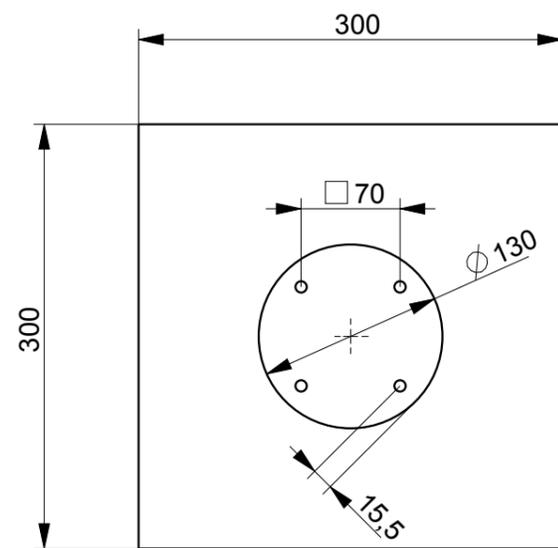
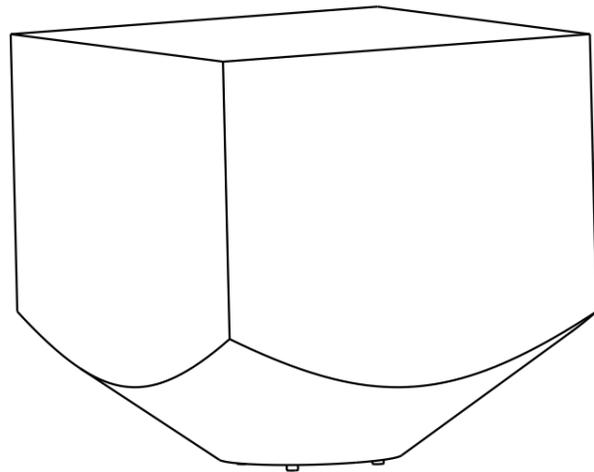
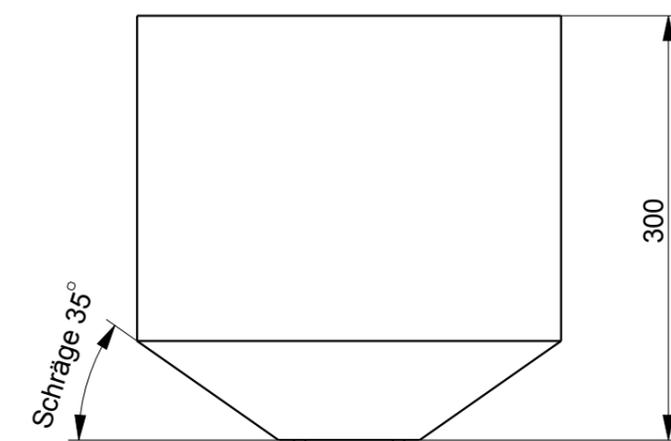
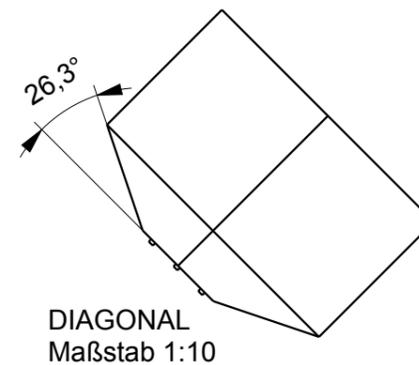
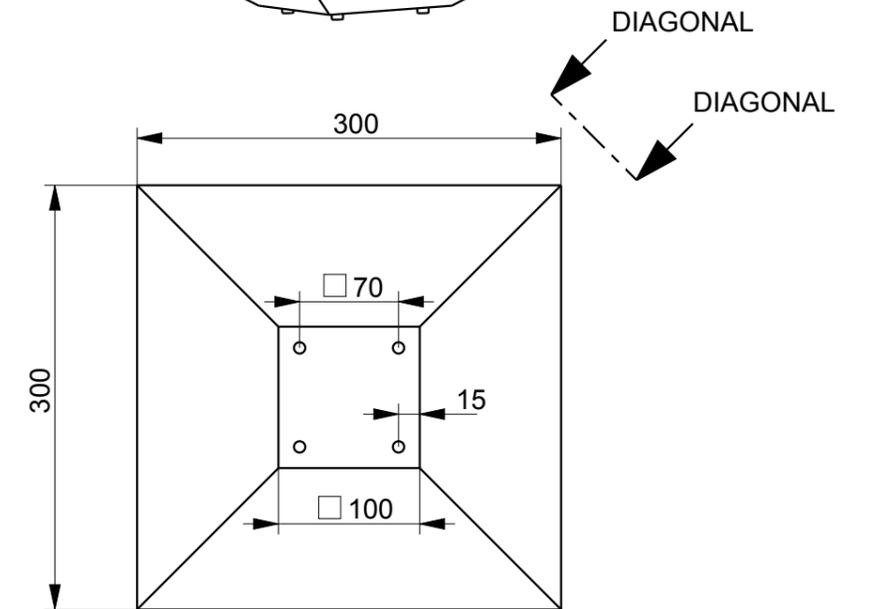
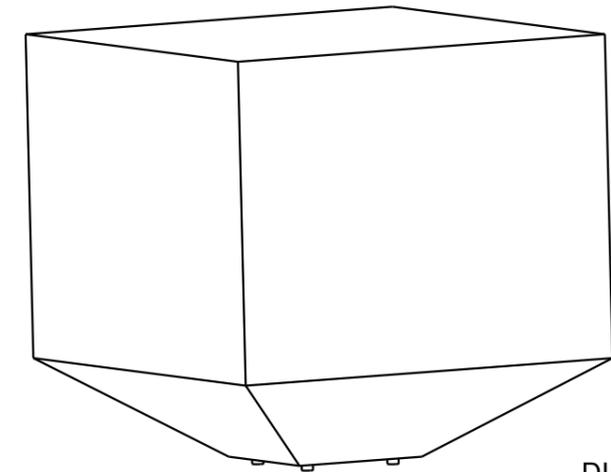


Abbildung 5: Auswirkung der Gestalt des Trichters auf das Volumen



Schräge [°]	Volumen [l]	
	runder Trichter	eckiger Trichter
25	24,78	24,82
30	24,25	24,31
35	23,66	23,73
40	23,00	23,09
45	22,23	22,33



Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	<b>1:5</b>	Matr.nr.:	0126058
		Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
	TU Wien	Abbildung 6	Blatt 1 von 1
		Abgabedatum:	2015

## 2.4.2 Sandungsanlage

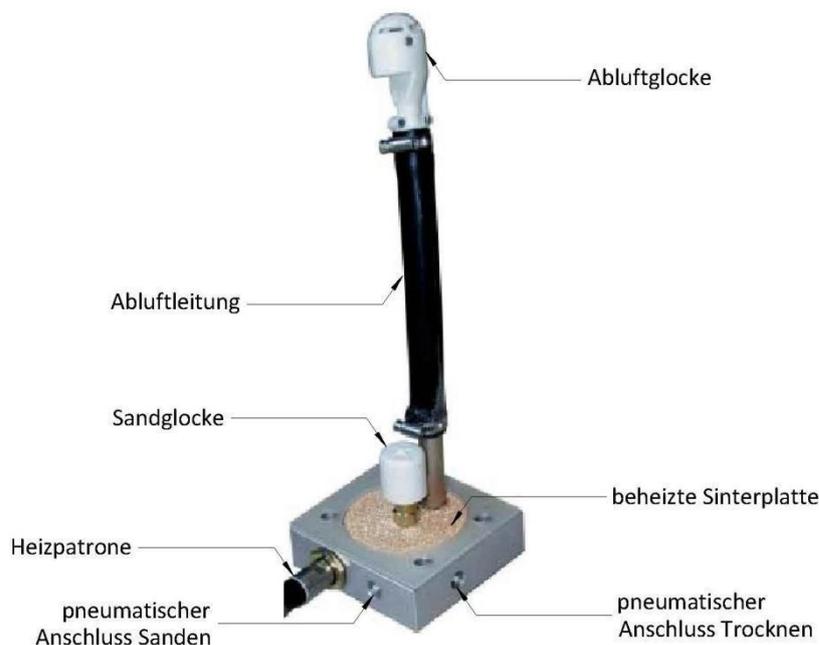


Abbildung 7: Sandungsanlage SDN14, Knorr-Bremse GmbH

Quelle: (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 34)

Direkt an der Unterseite des Sandkastens ist die Sandungsanlage montiert, die den Sand aus dem Sandkasten und weiter durch den Sandschlauch bis hin zum Rad-Schiene-Spalt fördert. Abbildung 7 zeigt eine Sandungsanlage nach dem Überdruckprinzip. Die in der Abbildung ersichtliche Grundplatte wird direkt bei der Firma Knorr-Bremse GmbH in einem Stück aus einem massiven Aluminiumblock gefertigt. Die Funktionsweisen der unterschiedlichen Sandungsanlagen werden im Kapitel 2.5 behandelt. In jedem Fall aber wird zum Betrieb der Sandungsanlagen Druckluft benötigt.

## 2.4.3 Druckluftversorgung

Hier gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten der Druckluftversorgung. Viele Fahrzeuge verfügen über eine eigene zentrale Druckluftversorgungsanlage, die z.B. für die Betätigung der Bremsen oder Türen benötigt wird. In diesem Fall entnimmt man idealerweise die Luft für die Sandungssysteme aus dem vorhandenen Druckluftnetz des Fahrzeugs. Der Versorgungsdruck beträgt etwa 8-10 bar. Es gibt aber auch Fahrzeuge, die kein eigenes Druckluftnetz besitzen, so genannte All-Electric-Fahrzeuge. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Light-Rail-Vehicles. In diesem Fall sind eigene Kleinverdichter für die Sandungsanlagen notwendig, wobei bis zu zwei Sandungsanlagen mit einem Verdichter betrieben werden können. Der Versorgungsdruck beträgt dabei meist weniger als 1 bar (Knorr-Bremse GmbH, 2007, S. 48f).

Je nach gewünschter Funktion (Sanden, Trocknen, Ausblasen), geforderter Sandmenge und verwendetem Typ von Sandungsanlagen, werden verschiedene Drücke benötigt. Diese müssen mit geeigneten pneumatischen Geräten aus dem bereitgestellten Versorgungsdruck erzeugt werden (Knorr-Bremse GmbH, 2007, S. 49f).

#### **2.4.4 Befüllung**

Bei der Befüllung gibt es zwei Unterscheidungsmerkmale:

- Die Lage der Einfüllöffnung: Bei am Drehgestell montierten Sandungssystemen befindet sich ein Deckel meist direkt am Sandkasten und gewährleistet eine einfache Befüllung. Bei Sandungssystemen, die im Wageninneren verbaut sind, erfolgt die Befüllung meist von außen. Das heißt es befindet sich eine Einfüllklappe in der Fahrzeugaußenwand, die durch einen elastischen, abgedichteten Einfüllstutzen mit dem Sandkasten verbunden ist. Wenn ein druckdichter Sandkasten gefordert wird, muss auch das Einfüllsystem druckdicht ausgeführt werden.
- Die Art der Befüllung: Die automatische Befüllung ähnelt dem Tankvorgang bei Kraftfahrzeugen. Eine Befüllpistole wird in die Einfüllöffnung gesteckt und der Sand wird durch die Befüllungsanlage in den Kasten gefördert. Bei drucklos arbeitenden Befüllungsanlagen muss durch die Konstruktion des Einfüllsystems sichergestellt sein, dass der Sand von alleine in den Kasten weiter rieselt. Bei der manuellen Befüllung kann z.B. der Sand mit einer kleinen Schaufel oder direkt aus einem Sandsack in die Einfüllöffnung geleert werden.

Die Funktionsweise der Befüllungsanlagen wird in Kapitel 2.6 beschrieben.

#### **2.4.5 Sandstandsanzeige**

Die Sandstandsanzeige dient zur Überwachung eines Mindestfüllstands. Sie liefert ein elektrisches Signal, wenn der Sandstand unter das Niveau der Lichtschranke der Sandstandsanzeige sinkt (vergleiche dazu Abbildung 8, die Lichtschranke befindet sich zw. Sender- und Empfängerdiode). Das Signal wird dann zum Führerstand weitergeleitet oder durch eine optische Anzeige im Sandkastendeckel erkennbar. Eine weitere Möglichkeit zur Sandstandskontrolle ist die Anbringung von Schaugläsern am Sandkasten, sofern diese gut einsehbar sind (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 61).



Abbildung 8: Sandstandsanzeige

Quelle: (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 60)

Diese Art der Füllstandskontrolle spiegelt jedoch ein sehr ungenaues Bild der Befüllung wider und kennt nur die beiden Zustände „Voll“ und „Nachfüllen“. Für zukünftige Sandungssysteme wird eine Sandstandsanzeige gefordert, die eine kontinuierliche Messung des Füllstands ermöglicht.

#### 2.4.6 Sandschlauch/-rohr und Sandrohrheizung

Der Sandschlauch bzw. das Sandrohr kann aus Stahl oder Gummi ausgeführt werden. Wenn sich die Sandungsanlage am Wagenkasten befindet, muss der Sandschlauch elastisch ausgeführt werden, um die Bewegungen des Drehgestells ausgleichen zu können. Bei Verwendung von Sandungsanlagen mit niedriger Sandaustrittsgeschwindigkeit muss bei der Verlegung des Schlauches darauf geachtet werden, dass der Sand von alleine durch den Schlauch rieseln kann. Es müssen also ein minimaler Neigungswinkel und ein minimaler Krümmungsradius eingehalten werden. Am Ende des Sandschlauches befindet sich die Sanddüse, die am Drehgestellrahmen fixiert ist. Diese muss so gestaltet werden, dass ein möglichst hoher Anteil der Sandmenge direkt in den Spalt zwischen Rad und Schiene gelangt. Dafür ist auch eine Nachstelleinrichtung erforderlich, um die Düse an die Abnützung der Räder anzupassen (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 43).

Um ein Einfrieren und Verstopfen der Sanddüse im Winterbetrieb zu verhindern, wird diese oft in Verbindung mit einer Sandrohrheizung ausgeführt (siehe Abbildung 9), welche das problemlose Zufließen des Streugutes auch bei Frost und Nässe garantiert (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 68).

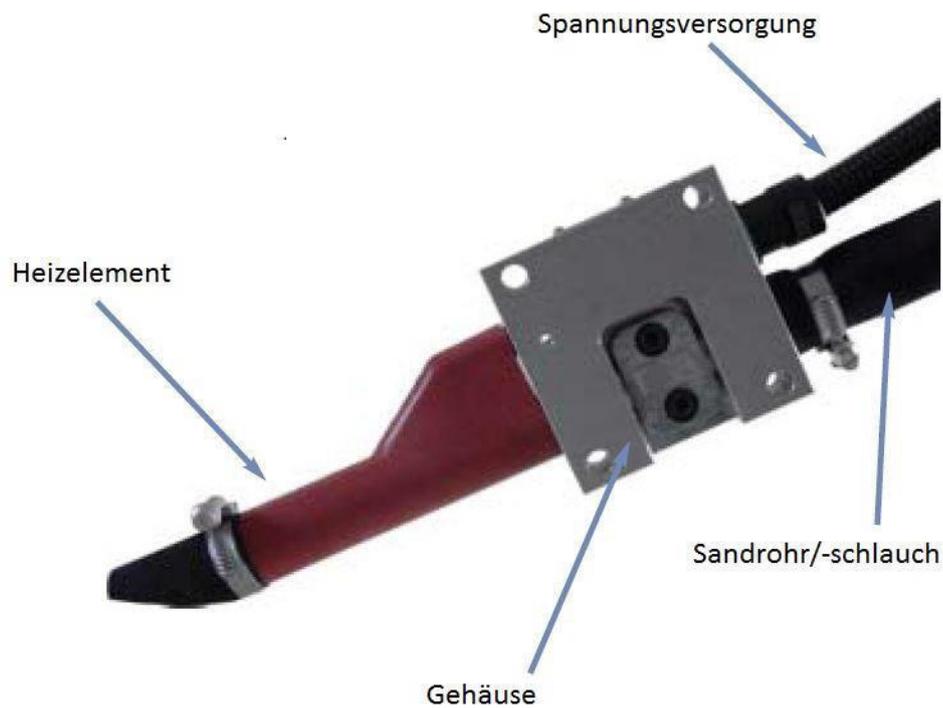


Abbildung 9: Sandrohrheizung

Quelle: (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 67)

### 2.4.7 Aufbau des Gesamtsystems

Die Abbildung 10 zeigt das Funktionsschema eines Sandungssystems. Daraus ist zu erkennen, dass für den Betrieb des Systems noch weitere Komponenten benötigt werden, z.B. Ventile und Steuerungselemente. Die einzelnen Komponenten können entweder auf einer Grundplatte montiert oder alle am Sandkasten angebracht werden. Auf jeden Fall wird das gesamte System als eine vormontierte Einheit ausgeführt.

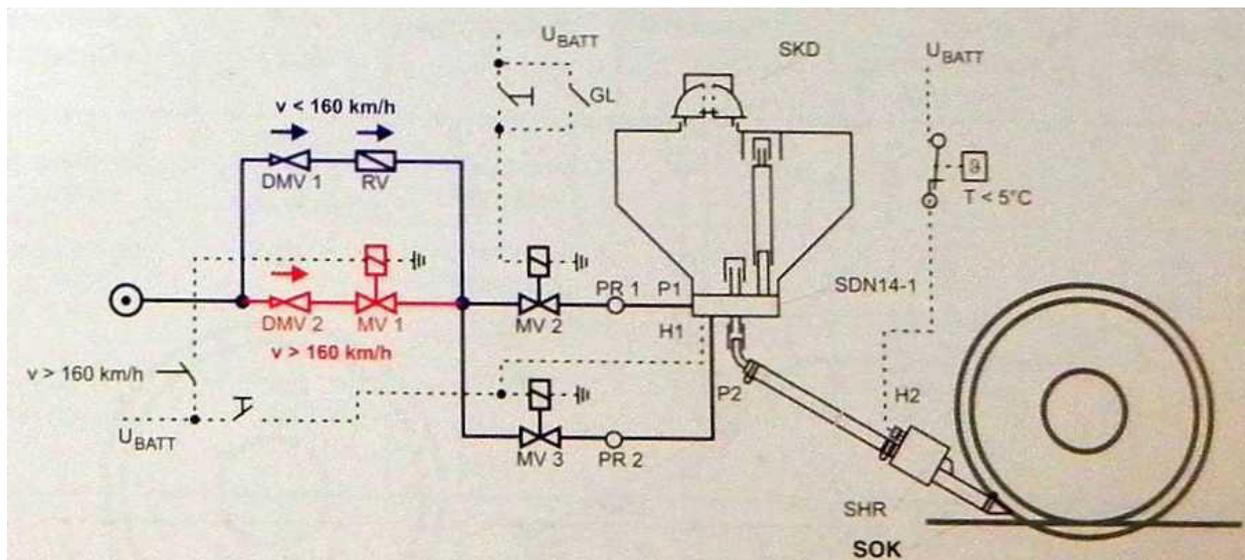


Abbildung 10: Allgemeines Aufbauschema eines kompletten Sandungssystems

Quelle: (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 27)

<b>DMV1</b>	Druckminderventil „Niedrig“ (z.B. 4,5bar)	<b>U<sub>BATT</sub></b>	Versorgungsspannung
<b>DMV2</b>	Druckminderventil „Hoch“ (z.B. 6bar)	<b>P1</b>	Pneumatischer Anschluss „Sanden“
<b>RV</b>	Rückschlagventil	<b>P2</b>	Pneumatischer Anschluss „Trocknen“
<b>MV1</b>	Magnetventil „Hoch“	<b>GL</b>	Gleit- / Schleuderschutzsignal
<b>MV2</b>	Magnetventil „Sanden“	<b>H1</b>	Sandungsanlagenheizung
<b>MV3</b>	Magnetventil „Trocknen“	<b>H2</b>	Spannungsversorgung/Steuerung Sandrohrheizung
<b>PR1</b>	Prüfanschluss 1	<b>SKD</b>	Sandkastendeckel mit integriertem Sicherheitsventil
<b>PR2</b>	Prüfanschluss 2	<b>SHR</b>	Sandrohrheizung

Tabelle 2: Legende zu Abbildung 10

## 2.5 Funktion von Sandungsanlagen

Die Dosierung und Förderung des Bremsandes erfolgt pneumatisch durch die Sandungsanlage. Innerhalb der Sandungsanlage gibt es keine mechanisch bewegten Teile. Die Sandfördermenge ist bei allen Geräten einstellbar je nach verwendeter Sandqualität und vom Betreiber gewünschter Menge. Darüber hinaus verfügen moderne Sandungsanlagen über geschwindigkeitsabhängige Regulierung der Sandfördermengen.

Weitere Funktionen der Sandungsanlage sind die Trocknung des Sandvorrats im Behälter und das Ausblasen des Sandrohrs, wobei nicht jede Sandungsanlage über alle Funktionen verfügt. Durch das Trocknen des Sandes im Behälter bleibt der Sand rieselfähig und verklumpt nicht. Außerdem wird dabei gleichzeitig die Sandungsanlage beheizt. Das Ausblasen dient dazu, dass keine Restsandmengen im Schlauch liegen bleiben und dort verklumpen und den Schlauch verstopfen. Außerdem kann diese Funktion zum Sandschlauchfreihalten bei den nachlaufenden Achsen des Drehgestells genutzt werden.

In den folgenden Abschnitten werden die unterschiedlichen Funktionsprinzipien der Sandungsanlagen vorgestellt.

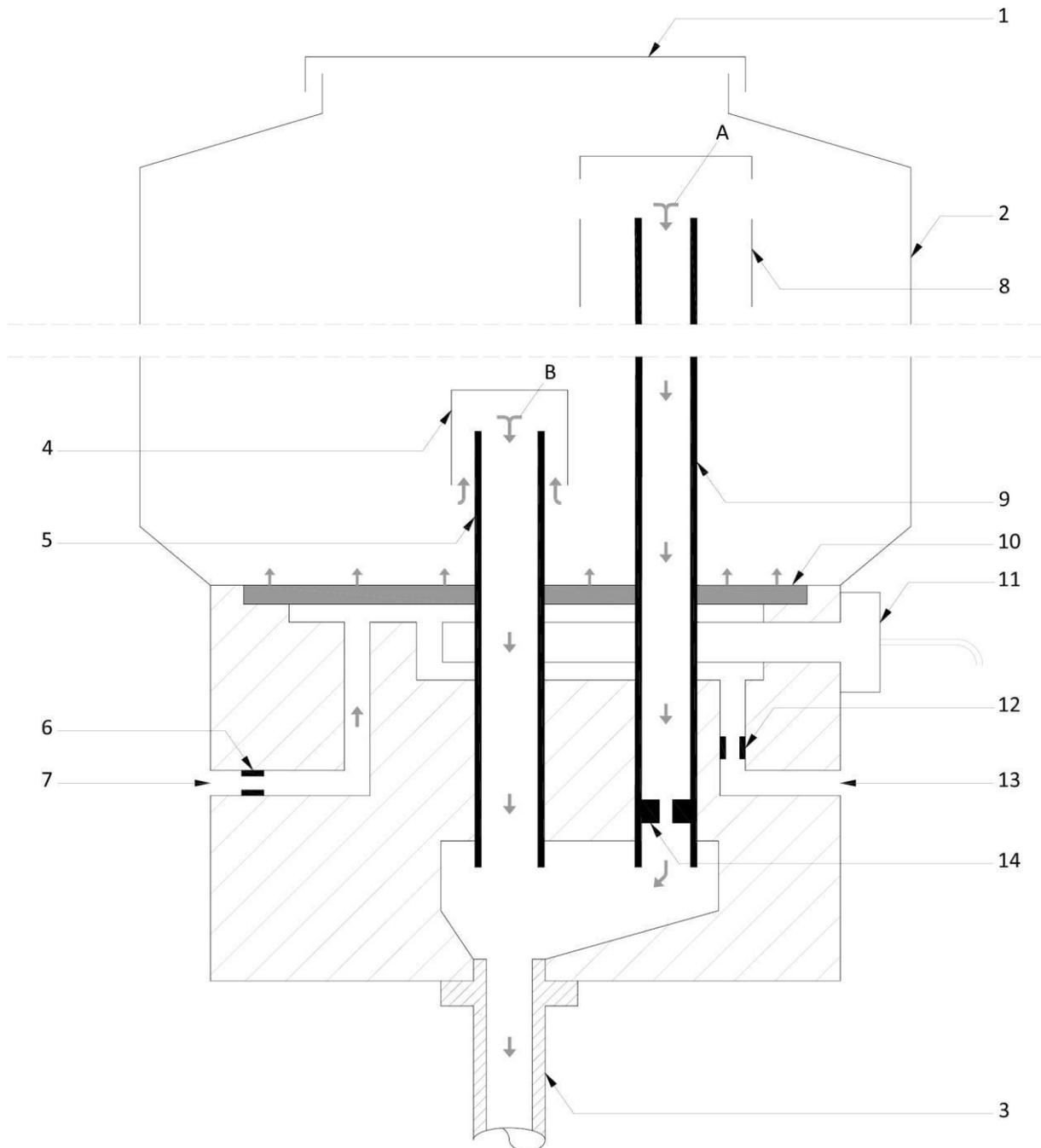
### 2.5.1 Überdruckprinzip

Abbildung 11 zeigt das Schema einer Sandungsanlage nach dem Überdruckprinzip. Beim Sandungsvorgang wird an den pneumatischen Anschluss Sanden (7) Druckluft angelegt und Luft strömt über die Sandungsdüse (6) und die Sinterplatte (10) in den Sandkasten (2), wodurch der Sand aufgelockert wird und im Behälter Überdruck entsteht. Voraussetzung dafür ist ein druckdichter Sandkasten. Dann teilt sich der Luftstrom in den Abluft- (A) und den Dosierluftstrom (B). Der Abluftstrom (A) durchströmt den Sand, gelangt über die Abluftglocke (8) in die Abluftleitung (9) und über die Abluftdüse (14) zurück ins Gehäuse, bevor er über das Sandrohr (3) abströmt. Die Abluftglocke wird an der höchsten Stelle im Sandkasten positioniert und wenn erforderlich zusätzlich durch ein Schutzblech abgedeckt, so dass sie von Sand freigehalten wird und durch die Abluftleitung nur Luft strömt, jedoch kein Sand gefördert wird.

Der Dosierluftstrom (B) strömt über die Sandglocke (4) ab und fördert dabei den Sand aus dem Kasten in den Sandungsstutzen (5). Die Sandglocke ist an der tiefsten Stelle im Sandkasten positioniert, so dass der Kasten nahezu vollständig entleert werden kann und der Restsand, der nicht aus dem Behälter gefördert werden kann, so gering wie möglich ist.

Die Sandfördermenge wird durch den beaufschlagten Druck und das Verhältnis der beiden Luftströme beeinflusst, welches durch die Sandungs- und die Abluftdüse bestimmt wird. Will man möglichst viel Sand fördern, so ist der Druck zu erhöhen, die Sandungsdüse zu vergrößern und die Abluftdüse zu verkleinern. So ergibt sich der größte Dosierluftstrom. Die Fördermenge ist zwischen etwa 200 und 2500 g/30s einstellbar. Abbildung 12 stellt die Abhängigkeit der Sandfördermenge vom Versorgungsdruck dar. Die Messungen wurden mit der Sandungsanlage SDN14 der Firma Knorr-Bremse durchgeführt.

Bei der Trocknung des Sandvorrats wird an den pneumatischen Anschluss Trocknen (13) Druckluft angelegt, zusätzlich wird die Sinterplatte (10) durch die Heizpatrone (11) beheizt. Die Luft strömt über die Trocknungsdüse (12) in den Sandkasten und wird dabei von der Sinterplatte (10) erwärmt. Der Luftstrom im Trocknungsbetrieb ist viel kleiner als beim Sanden, sodass auch der Dosierluftstrom sehr klein ist und es zu keinem unerwünschten Sanden kommt. Die erwärmte Luft durchströmt den Sand, der dadurch getrocknet und gleichzeitig aufgelockert wird, um ein Verklumpen zu verhindern.



- |   |                                         |    |                                  |   |                 |
|---|-----------------------------------------|----|----------------------------------|---|-----------------|
| 1 | Sandkastendeckel mit Überdrucksicherung | 8  | Abluftglocke                     | A | Abluftstrom     |
| 2 | Sandkasten                              | 9  | Abluftleitung                    | B | Dosierluftstrom |
| 3 | Sandrohr/ -schlauch                     | 10 | Sinterplatte                     |   |                 |
| 4 | Sandglocke                              | 11 | Heizpatrone                      |   |                 |
| 5 | Sandungsstutzen                         | 12 | Trocknungsdüse                   |   |                 |
| 6 | Sandungsdüse                            | 13 | pneumatischer Anschluss Trocknen |   |                 |
| 7 | pneumatischer Anschluss Sanden          | 14 | Abluftdüse                       |   |                 |

Abbildung 11: Schema einer Sandungsanlage nach dem Überdruckprinzip

Quelle: eigene Darstellung

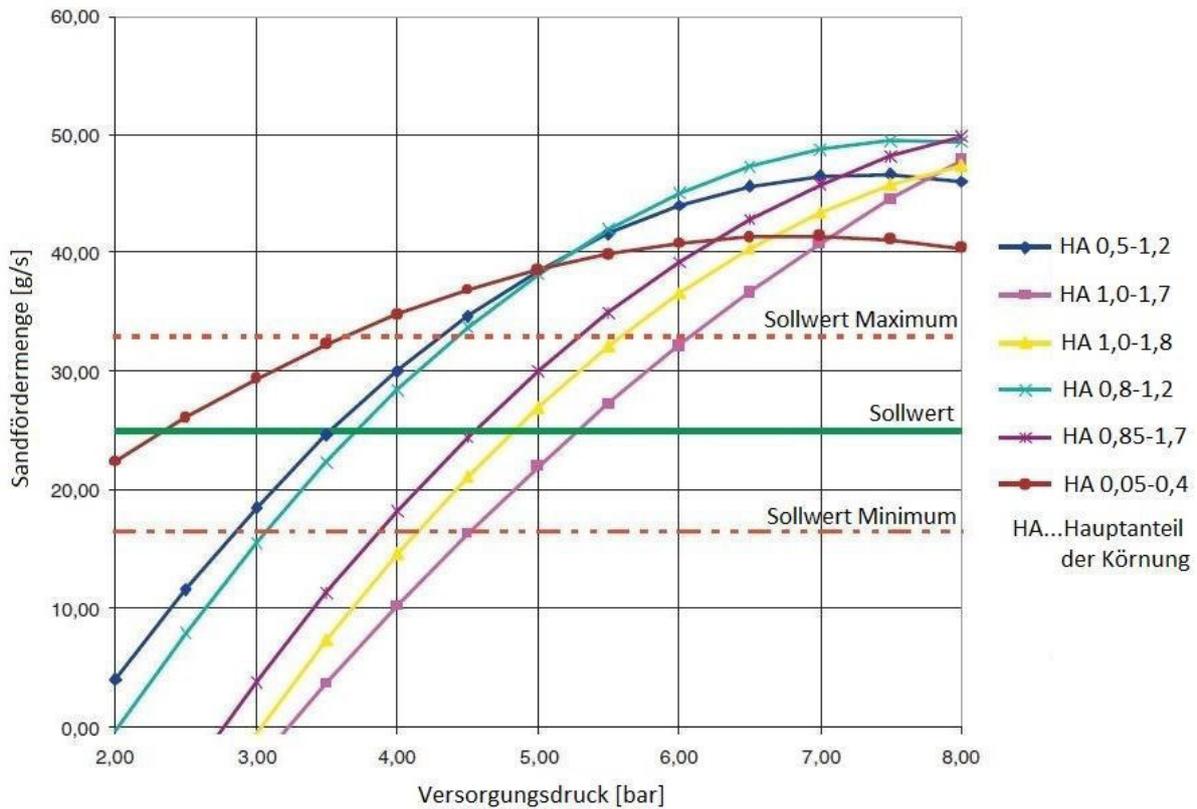


Abbildung 12: Diagramm Fördermenge, Druck, Körnung; Sandungsanlage SDN14

Quelle: (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 47)

Vorteile:

- Trocknung und Auflockerung des Streusands.
- Die Sandfördermenge kann in einem großen Bereich variiert werden.
- Die Fördermenge ist weitgehend konstant und unabhängig vom Füllstand im Sandkasten (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 36).

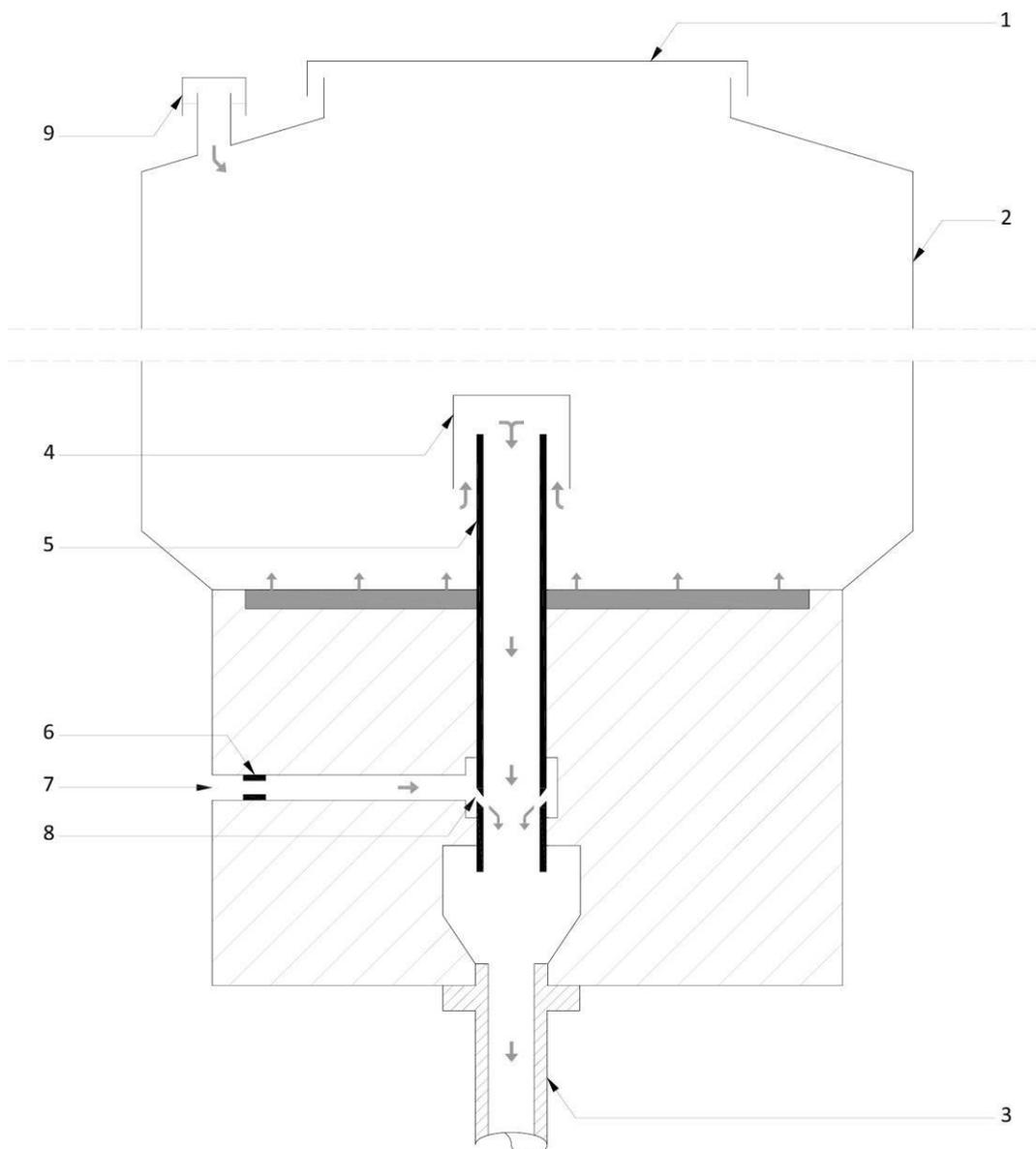
Nachteile:

- Der Sandkasten muss druckdicht ausgeführt werden.
- Niedrige Sandgeschwindigkeit im Sandrohr
- Hohe Ansprechzeit
- Die Neigung und Krümmung des Sandschlauchs müssen so ausgelegt sein, dass eine Selbstentleerung des Sandschlauchs möglich ist (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 37f).

## 2.5.2 Unterdruckprinzip

Abbildung 13 zeigt das Schema einer Sandungsanlage nach dem Unterdruckprinzip. Beim Sandungsvorgang wird über die Sandungsdüse (6) und die schräg nach unten gerichteten Bohrungen (8) Druckluft zugeführt. Dadurch entsteht im Sandungsstutzen (5) im Bereich oberhalb der Bohrungen Unterdruck, welcher den Sand ansaugt und über die Sandglocke (4)

in den Sandungsstutzen (5) fördert. Gleichzeitig verhindert über den Ansaugfilter (9) nachströmende Luft, dass sich im Sandkasten Vakuum bildet. Die Sandfördermenge wird dabei durch den Versorgungsdruck und die Größe der Sandungsdüse (6) bestimmt. Je höher der Druck und je größer die Düse, desto größer ist die Sandfördermenge. Die Fördermenge ist zwischen etwa 200 und 1200 g/30s einstellbar (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 54).



- |   |                    |   |                 |   |                                |
|---|--------------------|---|-----------------|---|--------------------------------|
| 1 | Sandkastendeckel   | 4 | Sandglocke      | 7 | pneumatischer Anschluss Sanden |
| 2 | Sandkasten         | 5 | Sandungsstutzen | 8 | Bohrungen Sandungsstutzen      |
| 3 | Sandrohr/-schlauch | 6 | Sandungsdüse    | 9 | Ansaugfilter                   |

Abbildung 13: Schema einer Sandungsanlage nach dem Unterdruckprinzip

Quelle: eigene Darstellung

Bei Sandungsanlagen nach dem Unterdruckprinzip kann der Sandvorrat im Behälter nicht getrocknet werden. Es ist lediglich möglich, die Sandungsanlage zu beheizen, wodurch auch der Streusand im unteren Teil des Sandkastens erwärmt wird. Es ist aber nicht möglich, warme Luft in den Sandkasten einzublasen, um den Sand zu trocknen und aufzulockern.

Vorteile:

- Der Sandkasten muss nicht druckdicht ausgeführt werden und kann daher kostengünstiger hergestellt werden.
- Hohe Sandgeschwindigkeit im Sandrohr
- Kurze Ansprechzeit
- Ungünstiger Verlauf des Sandrohrs/-schlauchs stellt kein Problem dar.
- Einfacher Aufbau der Sandungsanlage

Nachteile:

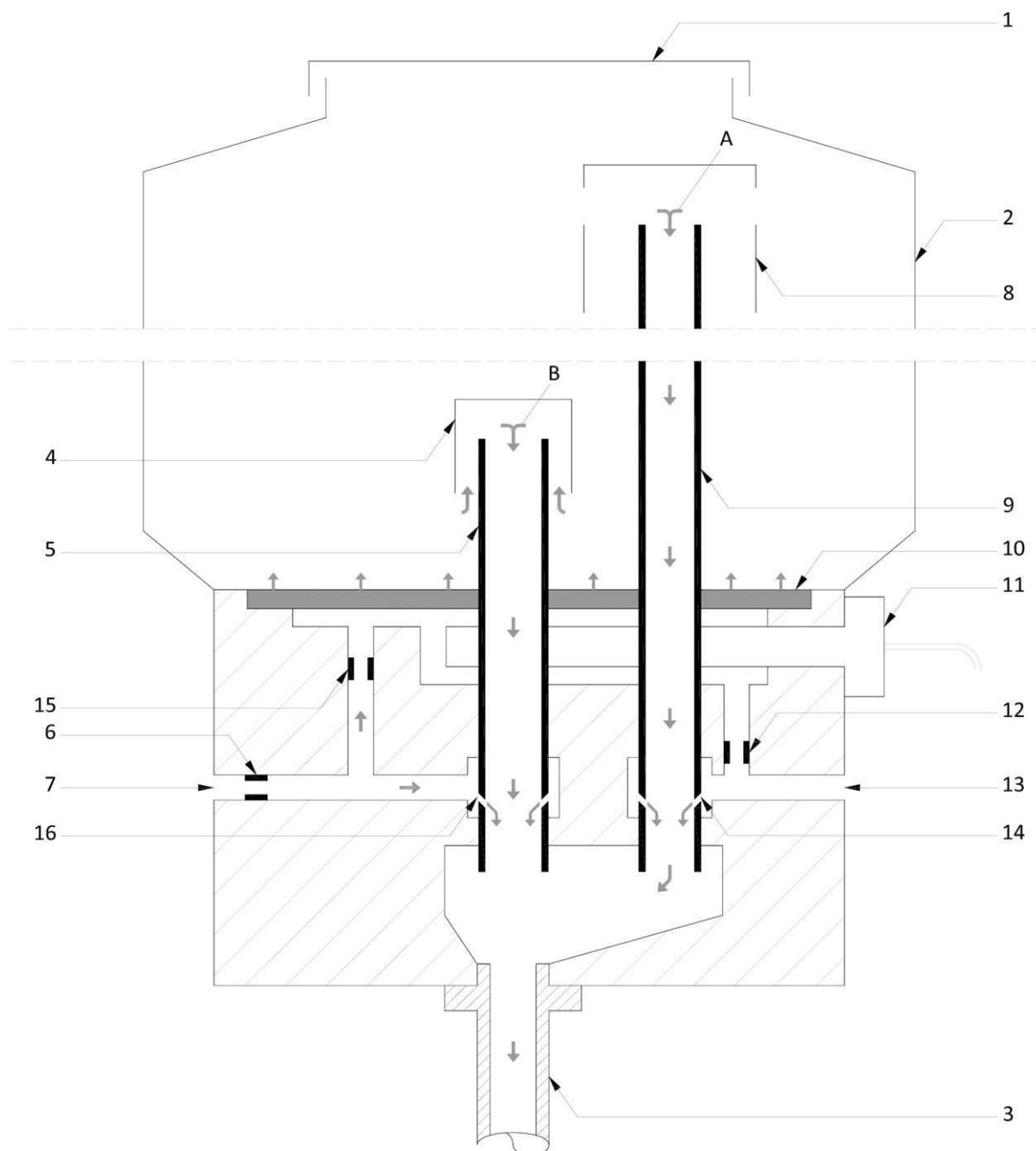
- Keine Sandtrocknung
- Kleinerer Sandfördermengendosierbereich
- Abhängigkeit der Fördermenge vom Sandkastenfüllstand
- Geringe Fördermengenkonstanz

### 2.5.3 Kombiniertes Überdruck-/Unterdruckprinzip

Abbildung 14 zeigt das Schema einer Sandungsanlage nach dem kombinierten Überdruck-/Unterdruckprinzip. Wie bei den anderen Verfahren wird beim Sandungsvorgang an den pneumatischen Anschluss Sanden (7) Druckluft angelegt. Dann verzweigt sich der Luftstrom schon im Gehäuse der Sandungsanlage: Ein Teil strömt wie beim Überdruckprinzip über die Sandungsdüse B (15) in den Sandkasten und verursacht dort einen Überdruck. Der andere Teil wird wie beim Unterdruckprinzip über die Bohrungen (16) schräg nach unten in den Sandungsstutzen (5) geleitet und erzeugt dort einen Unterdruck. Aus dem Sandkasten strömt die Luft wieder über die Sandglocke (4) und die Abluftglocke (8) in das Sandrohr (3), wobei über die Sandglocke Sand gefördert wird. Durch den zusätzlichen Luftstrom im Sandungsstutzen (5) wird die Förderung des Sandes unterstützt und der Sand wird mit hoher Geschwindigkeit aus dem Sandrohr geblasen.

Bei der Trocknung des Sandvorrats und dem Ausblasen des Sandschlauchs wird an den pneumatischen Anschluss Trocknen (13) Druckluft angelegt. Luft strömt dann einerseits über die Trocknungsdüse (12) und die beheizte Sinterplatte (10) in den Sandkasten, um den Sand zu trocknen und aufzulockern. Andererseits strömt Luft über schräg nach unten gerichtete Bohrungen (14) direkt in die Abluftleitung (9), um den Sandschlauch auszublasen.

Das Überdruck- und das Unterdruckprinzip wirken somit zusammen und die Vorteile der beiden Verfahren werden vereinigt, ohne die Nachteile der jeweiligen Bauform zu übernehmen. Außerdem ist das Ausblasen des Sandschlauchs möglich, ohne Sand aus dem Kasten zu fördern. Die Sandfördermenge ist zwischen etwa 200 und 2500 g/30s einstellbar.



- |   |                                |    |                                  |   |                 |
|---|--------------------------------|----|----------------------------------|---|-----------------|
| 1 | Sandkastendeckel               | 9  | Abluftleitung                    | A | Abluftstrom     |
| 2 | Sandkasten                     | 10 | Sinterplatte                     | B | Dosierluftstrom |
| 3 | Sandrohr/ -schlauch            | 11 | Heizpatrone                      |   |                 |
| 4 | Sandglocke                     | 12 | Trocknungsdüse                   |   |                 |
| 5 | Sandungsstutzen                | 13 | pneumatischer Anschluss Trocknen |   |                 |
| 6 | Sandungsdüse A                 | 14 | Bohrungen Abluftleitung          |   |                 |
| 7 | pneumatischer Anschluss Sanden | 15 | Sandungsdüse B                   |   |                 |
| 8 | Abluftglocke                   | 16 | Bohrungen Sandungsstutzen        |   |                 |

Abbildung 14: Schema einer Sandungsanlage nach dem kombinierten Über-/Unterdruckprinzip

Quelle: eigene Darstellung

Vorteile:

- Trocknung und Auflockerung des Streusands.
- Ausblasen des Sandschlauchs.
- Die Sandfördermenge kann in einem großen Bereich variiert werden.
- Die Fördermenge ist weitgehend konstant und unabhängig vom Füllstand im Sandkasten.
- Hohe Sandgeschwindigkeit im Sandrohr
- Kurze Ansprechzeit
- Ungünstiger Verlauf des Sandrohrs/-schlauchs stellt kein Problem dar.

Nachteil:

- Aufwändige Konstruktion der Sandungsanlage

#### **2.5.4 Zellenradprinzip**

Dieses Prinzip der Firma Nowe GmbH beruht auf der funktionellen und räumlichen Trennung von Dosierung und Förderung des Sands. Die Dosierung erfolgt durch das Zellenrad mittels Drehzahlsteuerung, die Förderung wie bei den anderen Sandungsanlagen pneumatisch. Im Gegensatz zu den zuvor vorgestellten Prinzipien befinden sich hier mechanisch bewegte Teile innerhalb der Sandungsanlage.

Abbildung 15 zeigt den Aufbau einer Sandungsanlage nach dem Zellenradprinzip, welche aus einer Dosier- (5) und einer Austragungseinheit (6) besteht. Wenn das Zellenrad (4) stillsteht, wird der Sandfluss unterbrochen und der Sandkasten (2) ist abgedichtet. Es kann also keine feuchte Luft von außen über den Sandschlauch in den Sandkasten eintreten. Beim Sandungsvorgang wird das Zellenrad (4) angetrieben und Sand gelangt dadurch in die Austragungseinheit (6). Von dort wird der Sand mittels Druckluft durch das Sandrohr (3) bis zum Rad-Schiene-Spalt gefördert.

Die Sandfördermenge wird durch die Drehzahl des Zellenrads gesteuert und ist zwischen 150 und 1300 g/30s einstellbar. Bemerkenswert ist zudem, dass die Sandaustrittsgeschwindigkeit unabhängig von der Fördermenge gesteuert werden kann.

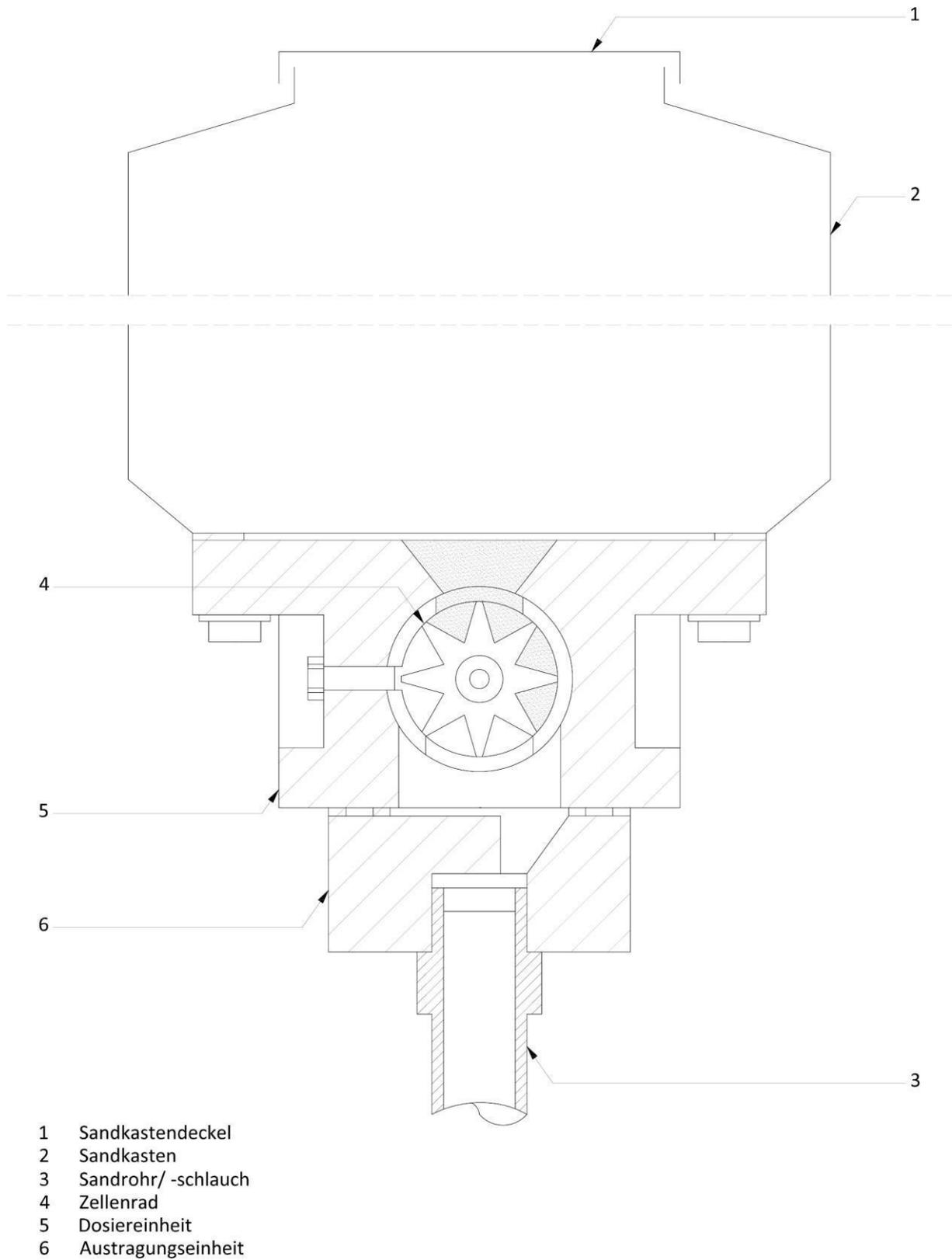


Abbildung 15: Sandungsanlage nach dem Zellenradprinzip der Firma Nowe GmbH

Quelle: eigene Darstellung

Vorteile:

- Der Sandkasten muss nicht druckdicht ausgeführt werden.
- Ausblasen des Sandschlauchs.
- Einfache Anpassung der Fördermenge an unterschiedliche Sandqualitäten.
- Die Fördermenge ist konstant und unabhängig vom Füllstand im Sandkasten.
- Die Sandgeschwindigkeit im Sandrohr kann unabhängig von der Fördermenge gesteuert werden.
- Ungünstiger Verlauf des Sandrohrs/-schlauchs stellt kein Problem dar.
- Sichere Sandflussunterbrechung.
- Sandkasten gegenüber Sandrohr abgedichtet.

Nachteile:

- Aufwändige Konstruktion
- Mechanisch bewegte Teile innerhalb der Sandungsanlage
- Großer Bauraum

## 2.6 Funktion der Befüllungsanlagen

Grundlegend können zwei Typen von Befüllungsanlagen unterschieden werden:

- Mobile Befüllungsanlagen (siehe Abbildung 16)
- Stationäre Befüllungsanlagen (siehe Abbildung 17)



Abbildung 16: Beispiele mobiler Befüllungsanlagen von 12 bis 500 Liter Sandvolumen

Quelle: (Klein Anlagenbau AG, 2012)

Mobile Befüllungsanlagen zeichnen sich durch die einfache Handhabung und die kleinen Abmessungen aus. Sie werden aus einem Sandsilo oder Sandsäcken befüllt und dann direkt an den Einsatzort verbracht. Dadurch sind sie unabhängig von aufwändiger Infrastruktur. Der Nachteil liegt in den beschränkten Füllmengen und der geringen Förderleistung. Die Förde-

zung des Sands erfolgt wie bei den stationären Sandtankstationen. Die mobilen Geräte besitzen einen Vorratsbehälter für den Sand und einen kleinen Druckbehälter.

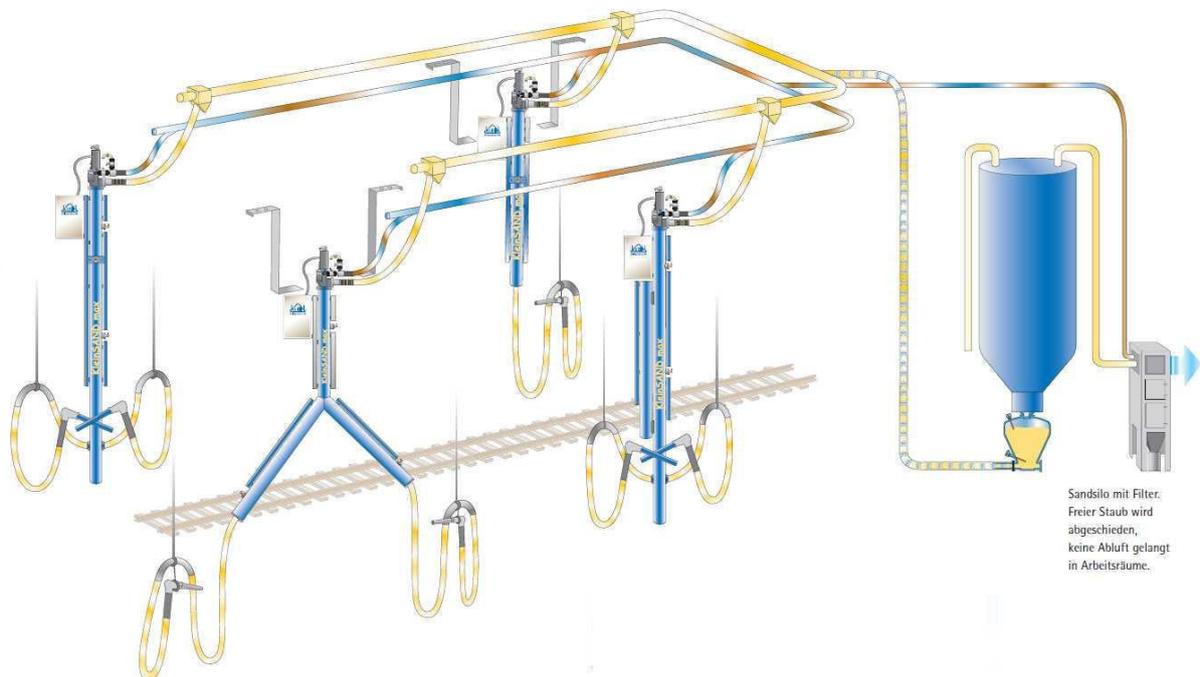


Abbildung 17: Schematische Darstellung einer stationären Befüllungsanlage

Quelle: (Klein Anlagenbau AG, 2013)

Stationäre Anlagen bestehen aus zwei getrennten Segmenten. Einerseits dem Vorratsbehälter - ein Sandsilo mit einem Nutzvolumen von ca. 10 bis 25 m<sup>3</sup> - und andererseits den Sandtankstationen direkt am Bahnsteig. Beide Segmente sind durch Förder-, Druckluft- und Abluftleitungen verbunden.

Unterhalb des Sandsilos befindet sich ein Druckgefäßförderer, der den Sand zu den Sandtankstationen transportiert. Das Förderverfahren entspricht dabei einer pneumatischen Rohrförderung im Druckbetrieb. Der Betriebsdruck des Druckgefäßförderers beträgt 5-6 bar. In der Rohrleitung stellt sich eine instationäre Dichtstromförderung ein, d.h. es bilden sich nach einer entsprechenden Förderstrecke Sandpfropfen, deren Abstände sich mit zunehmendem Förderweg vergrößern.

Die Sandtankstationen funktionieren auf ähnliche Weise. Sie besitzen ebenfalls einen Druckbehälter, allerdings beträgt der Druck hier nur etwa 2 bar und es bildet sich eine stationäre Dichtstromförderung aus. Dabei wird eine zusammenhängende, aufgelockerte „Sandwurst“ ruhig und stoßfrei durch den Füllschlauch transportiert. Die Länge des Füllschlauchs ist bei diesem Förderverfahren auf ca. 8 Meter begrenzt.

Derartige Anlagen sind als geschlossene Systeme ausgeführt. Das heißt, dass über den Einfüllstutzen der Bremssand direkt in den Sandbehälter gefüllt wird, während eine angeschlos-

sene Absaugvorrichtung am Füllstutzen den quarzhältigen Staub absaugt. So wird verhindert, dass das Bedienungspersonal mit dem reizenden Quarzstaub in Berührung kommt.

Seitlich neben dem Silo ist ein Filter angeordnet, über den die staubhaltige Förderluft beim Befüllen des Silos gereinigt wird. Außerdem wird dem Filter auch die staubhaltige Abluft von den Sandtankstationen zugeführt. Der Filter wird mit untergebaute Staubsaugtopf, mit eingelegtem PVC-Sack, geliefert. Dieser Sack muss von Zeit zu Zeit entleert bzw. entsorgt werden.

Um einen optimalen Betrieb des geschlossenen Systems zu gewährleisten, wäre es ideal, wenn der Einfüllstutzen dicht auf den Sandkasten gesetzt werden kann. Dies kann entweder über einen Adapter erfolgen oder indem bei der Planung der Befüllöffnung bereits auf die Erfordernisse des Sandfüllsystems eingegangen wird. Auch in der praktischen Handhabung am Gerät erscheint eine planerische Berücksichtigung sinnvoll, da das Hantieren mit Adapterstücken einen zusätzlichen Arbeitsaufwand darstellt.



Abbildung 18: Beispiel für Ausführung und Positionierung des Befüllstutzens

Quelle: (Klein Anlagenbau AG, 2013)

## 3 Anforderungen an Sandkästen

Dieses Kapitel stellt eine Zusammenfassung der allgemeinen Anforderungen und Konstruktionsvorgaben aus Lastenheften verschiedener Projekte dar. Diese Zusammenstellung erfolgt aus dem Grund, dass das zu entwerfende Konzept möglichst universell in verschiedenen Fahrzeugtypen eingesetzt werden soll und somit alle denkbaren Normen und Standards bereits im Vorfeld eingehalten bzw. erfüllt werden.

### 3.1 Normen und Standards

Die Entwicklung und die Herstellung des Systems müssen dem aktuellen Stand der gesetzlichen Bestimmungen, dem Stand der Ingenieurwissenschaften und den aktuellen Regeln der Technik entsprechen. Zu bestimmten Themen existieren mehrere Normen und Vorschriften. Neben den gültigen Gesetzen müssen folgende Normen, Regeln und Empfehlungen in nachfolgender Reihenfolge beachtet werden:

- Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOStrab) bzw. Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) einschließlich zugehöriger Richtlinien
- EN Normen
- DIN-Normen bzw. DIN-VDE-Bestimmungen
- VDV-Schriften

Insbesondere sind folgende Normen und Regelwerke zu berücksichtigen:

- EN 61373      Bahnanwendungen - Betriebsmittel von Bahnfahrzeugen - Prüfungen für Schwingen und Schocken
- EN 50121      Bahnanwendungen - Elektromagnetische Verträglichkeit
- EN 50155      Bahnanwendungen - Elektronische Einrichtungen auf Bahnfahrzeugen
- BN 918 224    DB-Norm zur Sandspezifikation
- BOStrab-Brandschutzrichtlinie
- DIN 5510      Vorbeugender Brandschutz in Schienenfahrzeugen
- EN 50125      Bahnanwendungen - Umweltbedingungen für Betriebsmittel
- EN 15085      Bahnanwendungen - Schweißen von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen
- EN ISO 3834    Qualitätsanforderungen für das Schmelzschweißen von metalli-

schen Werkstoffen

- EN ISO 5817 Schweißen - Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen)
- DIN 6701 Kleben von Schienenfahrzeugen und –fahrzeugteilen
- VDI 2716 Luft- und Körperschall bei Schienenbahnen des öffentlichen Personennahverkehrs
- EN ISO 3095 Akustik - Bahnanwendungen - Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen

Das Sandungssystem muss den mechanischen Einwirkungen nach EN 61373 widerstehen (siehe Kapitel 3.2). Alle eingebauten Geräte und ihre Verbindungselemente müssen für die Beanspruchung im Bahnbetrieb ausgelegt sein, d.h. Stöße und Schwingungen müssen ertragen werden. Die Befestigungselemente zum Wagenkasten sind gegen Auflaufstoß mit 3g auszulegen (Löser, 2007, S. 4ff).

Die ordnungsgemäße Funktion der Sandstreueinrichtung darf durch Steinschlag, durch mechanische und chemische Beanspruchung, durch heißes Druckwasser und durch Luftfeuchtigkeit nicht beeinträchtigt werden (Knorr-Bremse GmbH, 2007, S. 35 & 60).

Bei der Konstruktion der Fahrzeuge werden die BOStrab-Brandschutzrichtlinien und die DIN 5510 eingehalten. Als Brandschutzstufe wird die Stufe 3 festgelegt.

Das Sandungssystem ist für eine Verwendung von Sand entsprechend der BN 918 224 auszulegen (Bombardier Transportation, 2008b, S. 13).

Umweltbedingungen nach EN 50125 (Bombardier Transportation, 2008b, S. 18):

- Umgebungstemperaturbereich: -25 bis +45 °C
- Relative Luftfeuchtigkeit: ≤ 100 %

PH -Wert in der Waschstraße: neutral

## 3.2 EN 61373: Prüfungen für Schwingen und Schocken

Die EN 61373 (Stand 2010) dient dem Nachweis, dass die zu prüfenden Bauteile den Schwingungszuständen standhalten, die normalerweise für Schienenfahrzeuge zu erwarten sind. Die Norm beschreibt die Anforderungen für verschiedene Prüfungen mit rauschförmigem Schwingen und für Schockprüfungen, welche die Betriebsbedingungen während der zu erwartenden Lebensdauer nachbilden. Sie wird auf pneumatische, elektrische und elektroni-

sche Betriebsmittel und Bauteile, die in Bahnfahrzeugen eingebaut werden, angewendet (EN 61373, S. 6).

Die Prüfungen erfolgen nacheinander in vertikaler, lateraler und longitudinaler Richtung mit jeweils unterschiedlichen Prüfpegeln. Außerdem werden die Prüfwerte in drei Kategorien unterteilt, die vom Einbauort des Bauteils im Fahrzeug abhängen (EN 61373, S. 7):

- Kategorie 1: am Wagenkasten angebaut
- Kategorie 2: am Drehgestell angebaut
- Kategorie 3: am Radsatz angebaut

Für die beiden in dieser Arbeit behandelten Projekte gilt Kategorie 1, da die Sandkästen am Wagenkasten montiert werden. In diesem Fall sind die mechanischen Belastungen und folglich die Prüfwerte deutlich geringer als bei Kategorie 2 und 3.

Der Bauteil wird in seiner bestimmungsmäßigen Arbeitslage mit seinen normalen Befestigungsmitteln, einschließlich elastischer Halterungen, an der Prüfmaschine befestigt, genauso wie der Bauteil im Betrieb im Schienenfahrzeug befestigt wird. An diesen Befestigungspunkten erfolgen Messungen, um die Prüfanforderungen zu kontrollieren und ein Bezugssignal zu erhalten. Die Schwingungen an diesen Punkten dürfen nicht unter den festgelegten Mindestwerten liegen (EN 61373, S. 11).

Außerdem werden an einer oder mehreren Stellen auf dem Bauteil Messpunkte angebracht, um die Schwingungsantwort aufzunehmen. Vor dem Beginn und nach Beendigung aller festgelegten Prüfungen werden Messungen durchgeführt und Übertragungsfunktionen aus den rauschförmigen Signalen berechnet, die an den Befestigungs- und Messpunkten aufgenommen werden. Die Schwingungspegel für diese Messungen entsprechen denen der simulierten Lebensdauerprüfung (siehe später). Abweichungen und Veränderungen in den Übertragungsfunktionen vor und nach der Testreihe müssen untersucht und im Prüfbericht erklärt werden (EN 61373, S. 18).

Die Testreihe besteht aus folgenden Prüfungen (EN 61373, S. 10):

#### 1. Funktionsprüfung mit rauschförmigem Schwingen

Diese Prüfung dient zum Nachweis der Funktionsfähigkeit des Bauteils, wenn es Bedingungen ausgesetzt ist, die im Betrieb in einem Schienenfahrzeug auftreten werden. Die Prüfpegel (siehe Abbildung 19) entsprechen den üblichen Betriebspegeln im Bahnverkehr. Während dieses Tests müssen alle festgelegten Funktionen geprüft werden, er dauert normalerweise weniger als 10 Minuten.

## 2. Lebensdauerprüfung durch erhöhte Pegel des rauschförmigen Schwingens

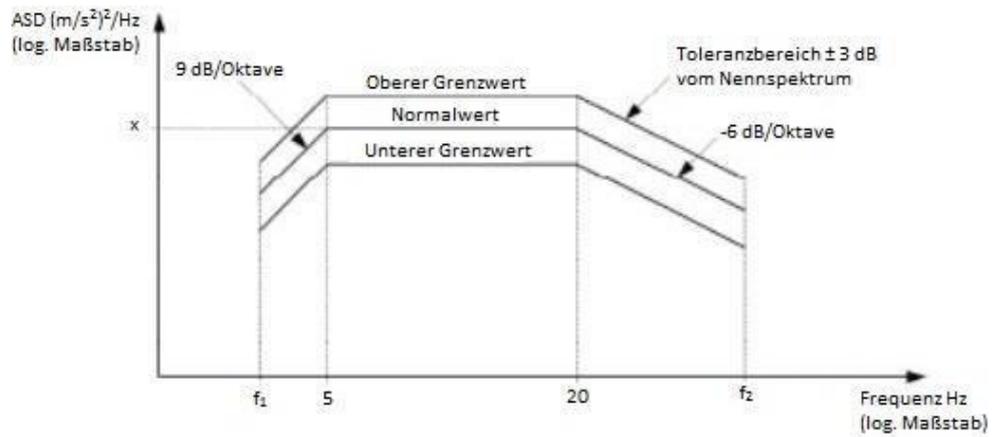
Die simulierte Lebensdauerprüfung erfolgt durch die Methode der Verstärkung, wobei die Amplituden vergrößert und die Zeitbasis verringert wird. Die Prüfpegel sind also höher als die Betriebspegel. Der Bauteil wird in jeder Richtung 5 Stunden unter den festgelegten Bedingungen beansprucht, der Test dauert also insgesamt 15 Stunden. Die Funktionsfähigkeit des Bauteils ist während dieser Prüfung nicht erforderlich. Die Abbildung 19 zeigt die Prüfbedingungen (Effektivwert, spektrale Beschleunigungsdichte, Frequenzbereich) für die Funktionsprüfung und die Lebensdauerprüfung.

## 3. Schockprüfung:

Diese Prüfung dient der Nachbildung von seltenen Betriebsereignissen. Dabei wird der Bauteil mehreren einzelnen halbsinusförmigen Impulsen ausgesetzt. Der Test besteht aus insgesamt 18 Schocks: jeweils drei positive und negative in jeder Richtung. Die Funktionsfähigkeit des Bauteils ist während dieser Prüfung nicht erforderlich. Die Abbildung 20 zeigt die Prüfbedingungen (Dauer und Spitzenbeschleunigung des Impulses) für die Schockprüfung.

Der Bauteil ist als zertifizierbar anzusehen, wenn

- die Veränderungen in den Übertragungsfunktionen vor und nach der Testreihe innerhalb der festgelegten Grenzwerte bleibt,
- die Funktionsprüfung positiv ist,
- das äußere Aussehen und die mechanische Unversehrtheit unverändert sind (EN 61373, S. 18).



bei einer Masse  $\leq 500$  kg:

$$f_1 = 5 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 150 \text{ Hz}$$

bei einer Masse  $> 500 \text{ kg} \leq 1\,250$  kg:

$$f_1 = \frac{1\,250}{\text{Masse}} \times 2 \text{ Hz}$$

$$f_2 = \frac{1\,250}{\text{Masse}} \times 60 \text{ Hz}$$

bei einer Masse  $> 1\,250$  kg:

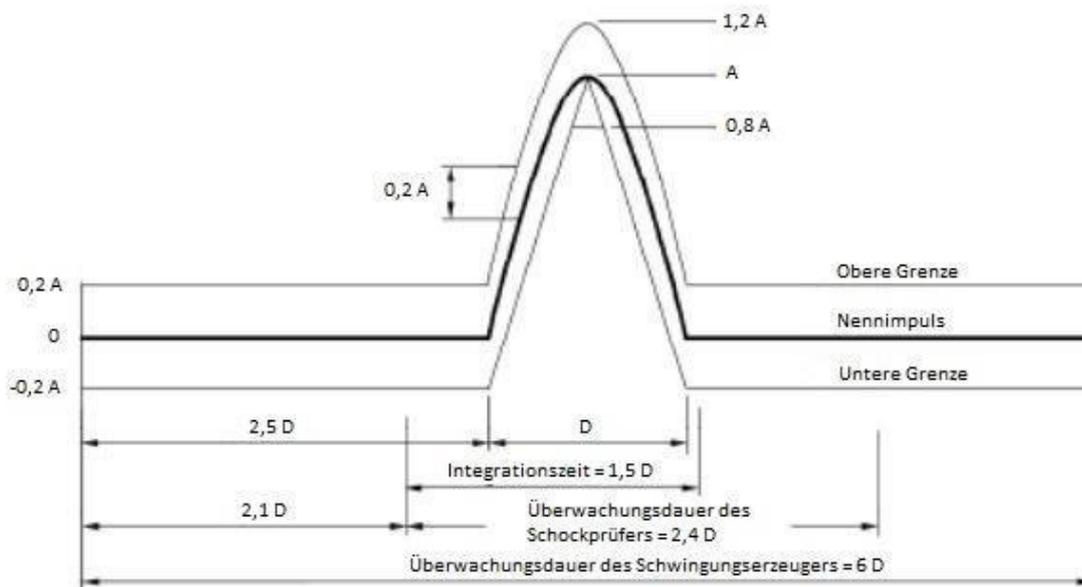
$$f_1 = 2 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 60 \text{ Hz}$$

	Senkrecht	Querrichtung	Längsrichtung
Funktionsprüfung ASD-Pegel (m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> /Hz	0,0166	0,0041	0,0073
Effektivwert m/s <sup>2</sup> 2 Hz bis 150 Hz	0,750	0,370	0,500
Lebensdauerprüfung ASD-Pegel (m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> /Hz	0,532	0,131	0,234
Effektivwert m/s <sup>2</sup> 2 Hz bis 150 Hz	4,25	2,09	2,83

Abbildung 19: Prüfbedingungen für Funktionsprüfung und Lebensdauerprüfung

Quelle: (EN 61373, S. 20)



Kategorie	Orientierung	Spitzenbeschleunigung A m/s <sup>2</sup>	Nenndauer D (ms)
1 Klasse A und Klasse B Am Fahrzeugkasten angebaut	Senkrecht	30	30
	Querrichtung	30	30
	Längsrichtung	50	30
2 Am Drehgestell angebaut	Alle	300	18
3 Am Radsatz angebaut	Alle	1 000	6

Abbildung 20: Prüfbedingungen für Schockprüfung

Quelle: (EN 61373, S. 25)

### 3.3 Konstruktionsvorgaben für Sandungssysteme

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Aspekte für die Konstruktion und den Aufbau eines Sandungssystems im Allgemeinen, sowie des Sandkastens im Speziellen, detailliert angeführt und beschrieben.

#### Aufbau des Systems:

- Das Sandungssystem ist modular aufgebaut und besteht u.a. aus den Komponenten Sandbehälter, Sandungsanlage, Druckluftherzeugung (wenn erforderlich), Befüllung, Sandschlauch, Ventile und Klemmleisten.
- Die Komponenten werden kompakt angeordnet und das Sandstreuungssystem wird als eine Baugruppe am Wagenkasten bzw. am Drehgestell mittels Schraubverbindungen lösbar angebracht (Bombardier Transportation, 2008b, S. 8).

- Das Sandungssystem wird so weit wie möglich montiert, verrohrt und verdrahtet, voreingestellt und funktionsgetestet geliefert. Die Geräte sollen nach korrektem Anschluss ohne weitere Arbeiten vollständig funktionsfähig sein (Bombardier Transportation, 2008b, S. 8f).
- Die Funktionsgruppen sind so auszuführen, dass deren Tausch als Modul erfolgen kann. Eine einfache Demontage der Komponenten ohne Demontage des gesamten Sandungssystems oder dessen Komponenten ist zu realisieren und auf Dauer unter allen Fahrzeugeinsatzbedingungen (Verschmutzung) zu gewährleisten (Bombardier Transportation, 2008b, S. 14ff).
- Bei der Konstruktion der einzelnen Baugruppen hat der sichere sowie kostengünstige Betrieb der Fahrzeuge höchste Priorität. Es sollen erprobte Bauteile eingesetzt werden, die wartungsarm sind und eine hohe Verfügbarkeit sowie einen wirtschaftlichen Einsatz der Fahrzeuge gewährleisten (Bombardier Transportation, 2008b, S. 14).
- Bei allen Projekten spielt das Gewicht eine große Rolle. Die Konstruktion ist daher auf optimale Festigkeit bei minimalem Eigengewicht zu entwickeln. Die Wandstärken sind so klein wie möglich zu wählen (Knorr-Bremse GmbH, 2007, S. 55).

#### **Einbauraum, Schnittstellen:**

- Durch den Fahrzeugbauer werden das Fahrzeugkonzept, die Schnittstellen und der Einbauraum vorgegeben. Die Konstruktion der Sandstreuereinrichtung und ihre Befestigung muss an die angrenzenden Baugruppen des Fahrzeuges (z.B. Sitzkasten, Doppelsitz, Radkasten, Radkastendurchführung, Seitenwand, Seitenwandverkleidung) angepasst werden (Knorr-Bremse GmbH, 2007, S. 42f).
- Alle zur Montage am/im Fahrzeug notwendigen Informationen und Vorgaben sind rechtzeitig mit dem Fahrzeugbauer abzustimmen. Dazu gehören:
  - Zeichnungen mit Außenabmessungen und Anschlussmaßen
  - Befestigungspunkte und Angaben zur Befestigung
  - Gewicht
  - Bedienungspositionen und Funktionen
  - Platz für Komponentenaustausch und Montage
  - Freiräume für Betrieb, Wartung und Instandsetzung
- Feste Bauteile, mit Ausnahme der elastischen Sandrohrendstücke, dürfen die Fahrzeugbegrenzung nach EBO bzw. BOStrab nicht überschreiten (Knorr-Bremse GmbH, 2007, S. 38).
- Teile des Sandungssystems dürfen mit beweglichen Bauteilen der Fahrzeuge auch in Grenzlagen nicht in Berührung kommen (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 19).

### **Geometrie des Sandbehälters:**

- Die Form des Sandbehälters muss so gestaltet werden, dass ein kontinuierliches eigenständiges Ausströmen des Sandes aus dem Behälter, bis zur nahezu völligen Entleerung, gewährleistet ist (Knorr-Bremse GmbH, 2007, S. 40).
- Die Einfüllöffnung hinter dem Verschluss ist so zu gestalten, dass der Sand durch eigenes Rieselvermögen in den Sandbehälter gelangen kann (Löser, 2007, S. 7).
- Das Totvolumen, d.h. der bei der Befüllung frei bleibende Raum, ist möglichst gering zu halten (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 41).
- Hohlräume sind, falls nicht generell vermeidbar, dicht zu schweißen oder, wenn nicht anders möglich, offen für eine gute Belüftung und Entwässerung zu gestalten (Bombardier Transportation, 2008b, S. 21).

### **Befüllung:** (Knorr-Bremse GmbH, 2007, S. 36ff):

- Der Sandkastenverschluss muss versperren bar sein und mit geringem Kraftaufwand geöffnet und geschlossen werden können, wobei Drehverschlüsse nicht zulässig sind.
- Der Vierkantschlüssel für den Verschluss des Deckels ist mit einem 8 mm Vierkant auszuführen
- Die Einfüllöffnung für die manuelle Befüllung muss im Querschnitt einer Kreisfläche von mindestens 100 mm Durchmesser entsprechen. Für die automatische Befüllung müssen die Vorgaben des Systemlieferanten berücksichtigt werden (siehe dazu auch die Ausführungen in Kapitel 2.6).
- Die Einfüllöffnung hinter dem Verschluss ist so zu gestalten, dass der Sand durch eigenes Rieselvermögen in den Sandbehälter gelangen kann.
- Die Befüllung muss sowohl händisch als auch mit einer drucklos arbeitenden Befüllanlage auf einfache Weise möglich sein
- Es muss sichergestellt sein, dass nach dem Einfüllen des Sandes kein liegen gebliebener Sand die Dichtung des Deckels beschädigt.
- Der Einbau einer optischen Anzeige (LED) für die Sandstandsüberwachung muss optional möglich sein.
- Bei Befüllung über eine Einfüllklappe in der Fahrzeugaußenwand muss in der Regel zwischen Sandkasten und Einfüllklappe eine abgedichtete, elastische Verbindung hergestellt werden. Dieser Einfüllstutzen muss Bautoleranzen des Wagenkastens bis zu 10 mm ausgleichen können und für einen Überdruck von 0,15 bar geeignet sein. Die Montierbarkeit dieser Komponente ist wegen der engen Einbauverhältnisse und der getrennten Montage von Aussenklappe und Sandkasten ein wichtiger Punkt.

### **Abdichtung:**

- Der Sandkasten bzw. seine Öffnungen müssen (Knorr-Bremse GmbH, 2007, S. 35)
  - gegen das Eindringen von Feuchtigkeit und Wasser abgedichtet sein,
  - gegen das unbeabsichtigte Austreten von Sand und Staub abgedichtet sein und

- eine Druckdichtheit bis 0,2 bar Überdruck aufweisen, falls eine Sandungsanlage nach dem Überdruckprinzip verwendet wird.
- Die Schnittstellen zur Sandungsanlage, Befüllung, Revisionsdeckel etc. müssen durch geeignete Flansche, Dichtungen oder Deckel einfach abdichtbar sein. Die (Boden-)flansche dürfen sich beim Anschrauben der Komponenten nicht durchbiegen (Knorr-Bremse GmbH, 2007, S. 55).
- Um Beschädigungen des Sandbehälters durch zu hohen Überdruck zu verhindern, ist eine Überdrucksicherung erforderlich (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 57).

#### **Zugänglichkeit:**

- Die Zugänglichkeit zu Baugruppen und Bauteilen, die der Wartung bedürfen, sowie zu Einstell- und Wartungseinrichtungen, muss im Wageninneren und im Radkasten (außen) gewährleistet sein (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 19).
- Die vorgesehenen Einrichtungen zur Sandmengenregulierung müssen gut zugänglich und einsehbar angeordnet werden. Die Voreinstellungen sind gegen unbeabsichtigtes Verstellen zu sichern und die Einstellung verliersicher und sichtbar zu kennzeichnen (Bombardier Transportation, 2008b, S. 10).

#### **Brandschutz:**

Die Gestaltung und Anordnung von Bauteilen erfolgt mit der Zielstellung,

- die Entstehung eines Brandes durch technische Fehler oder mangelhaft abgeleitete Wärme zu vermeiden,
- die Brandlegung zu erschweren,
- und die Brandausbreitung zu verhindern oder mindestens zu verzögern (Bombardier Transportation, 2008b, S. 16).

#### **Korrosion:**

- Alle Teile müssen den korrosiven Einwirkungen im Bahnbetrieb (z.B. Umwelteinflüsse und Reinigungsmittel) widerstehen.
- Für alle metallischen Teile ist ein wirksamer Rostschutz vorzusehen.
- Materialpaarungen mit unterschiedlichen elektrischen Potentialen sind nicht zulässig bzw. die Materialien sind dauerhaft gegeneinander zu isolieren.
- Die Innenflächen des Sandkastens müssen gegen den Abrieb durch den Sand beständig sein (Bombardier Transportation, 2008b, S. 14ff).

#### **Schraubenverbindungen:**

- Durchgangsverschraubungen sind zu bevorzugen.
- Es werden ausschließlich Schrauben aus nicht rostendem Werkstoff eingesetzt.
- Die Schraubkopfformen werden an den erforderlichen Stellen vandalismusresistent ausgeführt.

- Grundsätzlich wird jede Schraube gegen Lockern und Losdrehen gesichert. Dies wird entweder durch gezielte konstruktive Auslegung (z.B. Dehnschraubenverbindung) oder durch die Anwendung geeigneter Sicherungselemente realisiert (Bombardier Transportation, 2008b, S. 20ff).

#### **Bestimmungen zu Fügeverfahren:**

- Schweißverbindungen  
Zur Sicherung der Güte der Schweißarbeiten gelten die DIN EN 6700 sowie die EN ISO 3834. Es ist eine schweißtechnische Bauweiseprüfung durchzuführen. Sämtliche Schweißarbeiten werden unter Aufsicht eines zugelassenen Schweißfachingenieurs von geprüften Schweißfachkräften nach den anerkannten Regeln der Technik ausgeführt. Alle Schweißnähte sind aus Korrosionsschutzgründen nachzubehandeln (beizen, strahlen, bürsten, etc.) (Bombardier Transportation, 2008b, S. 22).
- Klebeverbindungen  
Die Norm DIN 6701 – Kleben von Schienenfahrzeugen - ist zu berücksichtigen. Klebstoffe und Klebeverbindungen müssen beständig gegen handelsübliche Reinigungsmittel und betriebsmäßig eingesetzte Schmiermittel sein (Bombardier Transportation, 2008b, S. 22).

#### **Sandstandsanzeige:**

- Insbesondere dort, wo die Sandkästen uneinsehbar in den Fahrzeugen verbaut sind, wird eine Überwachungseinrichtung zur Sicherstellung einer Mindestsandmenge erforderlich (Knorr-Bremse GmbH, 2007, S. 56).
- Die Anordnung des Sensors zur digitalen Sandstandserfassung ist so zu gestalten, dass der Sensor an mindestens drei Positionen oder gleitend verstellbar angebracht werden kann (Bombardier Transportation, 2008b, S. 11).

#### **Dämmung:**

- Die Baugruppe zur Druckluftherzeugung ist bei Erfordernis durch geeignete Maßnahmen gegen die Abstrahlung von Luftschall zu dämmen und gegen die Einleitung von Körperschall in den Wagenkasten zu isolieren (Bombardier Transportation, 2008b, S. 9f).
- Durch das Sandungssystem dürfen keine Geräusche (z.B. Klappern, Schlagen) verursacht werden - ausgenommen betriebsbedingt nicht vermeidbare Geräusche. Der Anteil des durch das Sandungssystem erzeugten Geräuschpegels muss geringer sein als der für das Fahrzeug geltende Wert. Der maximal zulässige Geräuschpegel des Sandungssystems beträgt 60 dB (A) (Bombardier Transportation, 2008b, S. 17).

#### **Sonstiges:**

- Scharfe Ecken oder Kanten sind nicht zulässig (Arbeitsschutz) (Bombardier Transportation, 2008b, S. 22).

- Der Sandkasten muss eine sichere und einfache Schnittstelle zur Sandungsanlage aufweisen. Der Bodenflansch darf sich beim Anschrauben der Sandungsanlage nicht durchbiegen (Knorr-Bremse GmbH, 2002, S. 40).
- Die Rohrleitungen zu den Sandstreuereinrichtungen sind so auszuführen, dass die Druckverhältnisse an allen Sandungsanlagen gleich sind (Knorr-Bremse GmbH, 2007, S. 33).
- Es dürfen keine Gussteile zur Verwendung kommen, die nur unter speziellen Anforderungen gefertigt werden können (Bombardier Transportation, 2008b, S. 14).

### 3.4 Material

In der Basisvariante ist ein Sandkasten aus korrosionsfreiem Metall (Aluminium oder nichtrostender Stahl) vorzusehen. Optional sind Behälter aus nichtmetallischen Werkstoffen (Kunststoff) anzubieten (Bombardier Transportation, 2008b, S. 9f).

Folgende Werkstoffe dürfen auf keinen Fall verwendet werden. Auch in einer konstruktiven Verbindung sind diese Stoffe nicht zulässig (Bombardier Transportation, 2008b, S. 14f):

- Asbest und Asbestverbindungen
- PVC
- Halogen
- Blei und Bleiverbindungen (ausgenommen Batterien)
- Kadmium und Kadmiumverbindungen
- Isocyanate
- Freon
- Polycyclisch aromatische Kohlenwasserstoffe
- Arsen und Arsenverbindungen

Folgende Materialien dürfen nicht für die Konstruktion des Systems verwendet werden. Nur wenn diese Werkstoffe in einer Komponente (z.B. elektronische Bauteile, Legierungsmittel) unumgänglich sind, können diese Werkstoffe zugelassen werden (Bombardier Transportation, 2008b, S. 15):

- Nickel
- Kobalt
- Leder mit Chromzusätzen
- Formaldehyd
- Quecksilber
- PCB
- Holz vom Regenwald (tropische Hölzer)

- bromhaltige Materialien

Die Anstrich- und Beschichtungsstoffe müssen möglichst chromat- und schwermetallfrei sein (Bombardier Transportation, 2008b, S. 14).

Gummiprofile, synthetische Profile und Kunststoffe müssen licht-, riss-, fett-, öl- und wasserbeständig sein. Die Optik, Festigkeit, Steifigkeit und Gebrauchseigenschaften dürfen durch Alterung des Materials nicht beeinträchtigt werden (Bombardier Transportation, 2008b, S. 14).

Alle Bauteile sind aus unbrennbaren oder schwer entflammaren Materialien herzustellen und müssen ausreichend Widerstand gegen die Entstehung und Ausbreitung von Bränden bieten. Sie dürfen keine toxischen oder zündfähigen Gase abgeben (Bombardier Transportation, 2008b, S. 16).

Zur Vermeidung von gesundheitsschädlichen und umweltbelastenden Einflüssen im Betrieb bzw. bei der Verarbeitung gilt:

- Die Materialauswahl ist so zu wählen, dass die Umweltbelastung während der gesamten Lebensdauer des Fahrzeuges minimiert wird. Die eingesetzten Stoffe müssen bei Außerbetriebnahme wieder verwertbar sein, mindestens aber der problemlosen Abfallentsorgung zugeführt werden können (Bombardier Transportation, 2008b, S. 14ff).
- Die Materialien dürfen keine Ausdünstungen (z.B. unangenehme Gerüche oder gesundheitsschädliche Emissionen) verursachen (Bombardier Transportation, 2008b, S. 14).
- Auf die Anwendung gesundheitsschädlicher und umweltbelastender Pflege- und Reinigungsmittel während der Fertigung wird verzichtet (Bombardier Transportation, 2008b, S. 18f).
- Die Anwendung silikonhaltiger Reinigungs- und Pflegemittel ist nicht zulässig (Bombardier Transportation, 2008b, S. 19).

## 4 Vorstellung der Projekte

In diesem Kapitel werden die zwei Projekte vorgestellt, anhand derer untersucht werden soll, ob es eine Alternative zu den herkömmlichen geschweißten Sandkästen gibt. Es handelt sich um ein Schnellbahn- und um ein Straßenbahnprojekt, wobei sich in beiden Fällen die Sandkästen, vor Umwelteinflüssen geschützt, im Inneren des Wagenkastens befinden. Außerdem sind die Stückzahlen im Vergleich zu anderen Projekten groß und das geforderte Sandvolumen klein. Also bieten die beiden Projekte gute Voraussetzungen, um die Sandkästen aus Kunststoff fertigen zu können.

### 4.1 Das Schnellbahnprojekt

Bei dem Schnellbahnprojekt handelt es sich um ein Nachrüstprojekt, wobei die Bremswirkung bei den bestehenden Fahrzeugen durch den nachträglichen Einbau zusätzlicher Sandungssysteme verbessert werden soll. Abbildung 21 zeigt die Fahrzeugkonfiguration mit den bereits bestehenden (in Grün eingefärbt) und den gewünschten zusätzlichen (in Lila gekennzeichnet) Sandungssystemen.



Abbildung 21: Anordnung der Sandkästen, Schnellbahnprojekt

Quelle: (Bombardier Inc., 2008a)

Das Zweirichtungsfahrzeug besitzt fünf Fahrwerke, davon sind alle - mit Ausnahme des mittleren (Achsen 5 und 6) - als Triebfahrwerke ausgeführt. Bisher bestehen Sandungssysteme nur bei der ersten und der letzten Achse. Das heißt, für die jeweilige Fahrtrichtung wird nur jeweils die vorderste Achse gesandet, was in unzureichenden Brems- und Beschleunigungsleistungen bei schwierigen Umweltbedingungen resultierte. Jetzt sollen an den Achsen 2, 3, 4, 7, 8 und 9 zusätzliche Sandungssysteme installiert werden. Für die eine Fahrtrichtung

werden dann die Achsen 1, 3, 7 und 9 gesandet, für die andere Richtung die Achsen 10, 8, 4 und 2 (Bombardier Inc., 2008a, S. 2).

### 4.1.1 Grundlagen des Sandungssystems

In der folgenden Auflistung werden die wichtigsten Merkmale, Eckdaten, die geforderten Funktionen und die gewünschte Ausstattung der Sandungssysteme zusammengefasst:

- gefordertes Sandvolumen: 17 l (Krismanic, 2008, S. 4)
- Stückzahlen: 291 Fahrzeuge, 12 Sandungssysteme pro Fahrzeug (Krismanic, 2008, S. 1) → gesamt 3.492 Sandungssysteme
- Einfüllklappe für automatische Befüllung im Wageninneren (Krismanic, 2008, S. 3)
- Eine Sandstandsanzeige pro Sandkasten bei ca. 40% des Füllvolumens (Krismanic, 2008, S. 4)
- Verwendung einer Sandungsanlage nach dem kombinierten Über-/Unterdruckprinzip (Krismanic, 2008, S. 2)
- kein druckdichter Sandkasten erforderlich (Krismanic, 2008, S. 5)
- Versorgung aus dem zentralen Druckluftnetz mit 8-10 bar (Krismanic, 2008, S. 5)
- geschwindigkeitsabhängige Regulierung der Sandstreuemenge (Krismanic, 2008, S. 4)
- Sandfördermenge einstellbar zwischen 300 und 1000 g/30s (Löser, 2007, S. 6)
- Ausblasfunktion erforderlich, da der Sandschlauch im Bodenprofil horizontal bis zum Radkasten verlegt wird (Krismanic, 2008, S. 4)
- Verwendung von Sandrohrheizungen (Krismanic, 2008, S. 3)
- Trocknungsfunktion nicht erforderlich, da sich der Sandkasten im Inneren des Wagens befindet (Krismanic, 2008, S. 3)
- Sandspezifikation nach DB-Norm BN918224 (Krismanic, 2008, S. 5)
- Klimazone Mitteleuropa, Temperatur -25°C bis +50°C (Krismanic, 2008, S. 5)
- Verwendung von nichtrostendem Stahl mit lackierter Oberfläche, wenn der Sandkasten aus Metall gefertigt wird (Krismanic, 2008, S. 5).

### 4.1.2 Mechanische Konstruktion

Bei der Suche nach möglichen Einbauräumen stellte sich heraus, dass die zusätzlichen Sandungssysteme nur im Fahrzeuginneren untergebracht werden können. Für die Achsen 3, 4, 7 und 8 befindet sich der am besten geeignete Platz unter den Sitzen direkt hinter der Einstiegstür, siehe Abbildung 22. Bei den Achsen 2 und 9 erfolgt die Unterbringung unmittelbar hinter der Reihenbestuhlung oberhalb der Drehgestelle, siehe Abbildung 23. Trotz der unterschiedlichen Einbauorte im Fahrzeug sind die vorgegebenen Einbauräume (Abmessungen und Schnittstellen zum Fahrzeug) identisch.

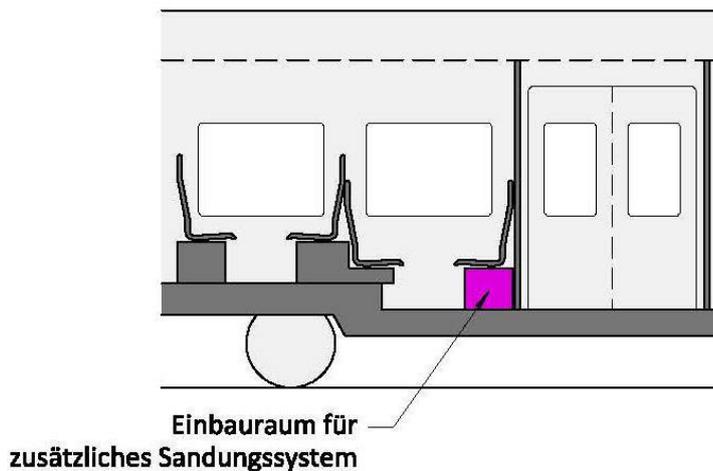


Abbildung 22: Platzierung der Sandungsanlage bei den Achsen 3,4,7 und 8

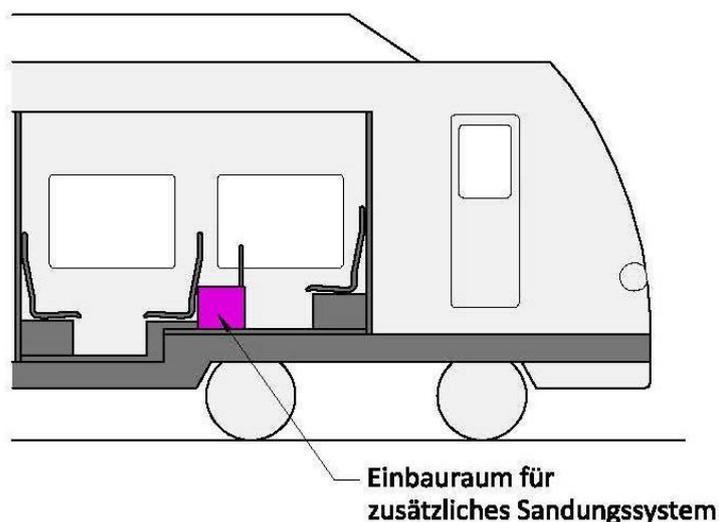


Abbildung 23: Platzierung der Sandungsanlage bei den Achsen 2 und 9

Bei den Achsen 3, 4, 7 und 8 werden die Sandungssysteme unterhalb der bestehenden Sitze eingebaut. Diese Doppelsitze sind auf einem Rahmen montiert, siehe rechts in Abbildung 24. Dieser Rahmen besitzt vier vorgegebene Anschlusspunkte. Bisher erfolgte die Befestigung durch einen Sitzfuß in einer Schiene im Fußboden und durch einen Wandadapter in einer Schiene in der Seitenwand, siehe links in Abbildung 24. Um mehr Raum für den Sandkasten zu erhalten, werden jetzt Sitzfuß und Wandadapter weggelassen. Stattdessen soll der Sitzrahmen auf einer Kiste („Sitzkiste“) montiert werden, innerhalb der sich das Sandungssystem befindet, siehe rechts in Abbildung 24. Diese Kiste wird dann wieder in den Schienen in Seitenwand und Fußboden befestigt. Die Sitzkiste gehört zum Lieferumfang des Sandungssystems und kann eine Einheit mit dem Sandkasten bilden. Bei der Konstruktion ist darauf zu achten, dass das Gewicht des Sitzes und der Fahrgäste von der Sitzkiste getragen werden muss.

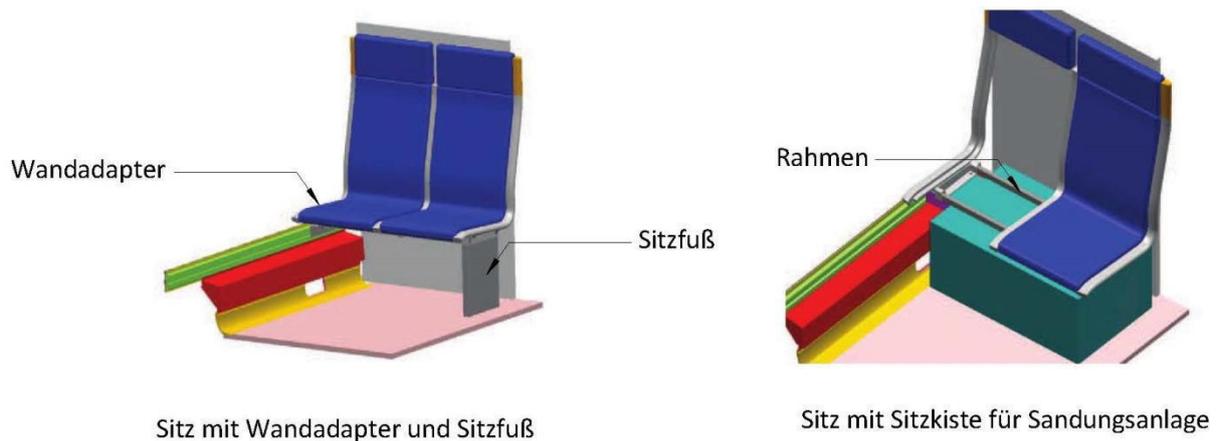


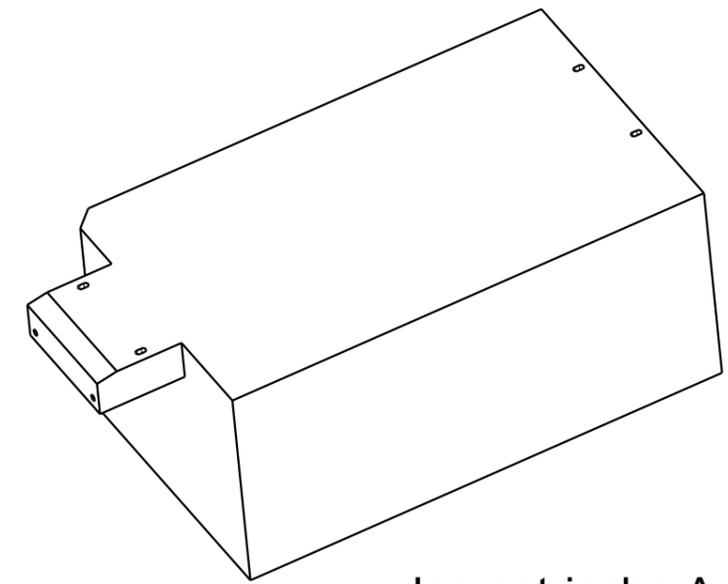
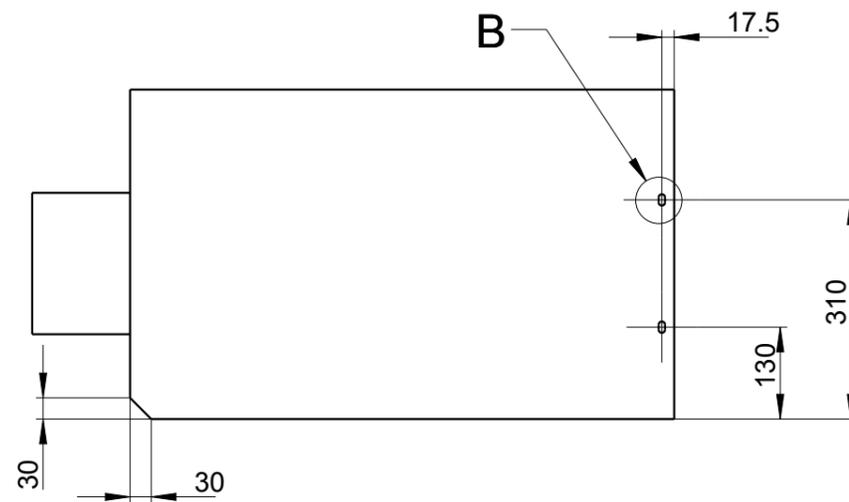
Abbildung 24: Sitzkonstruktion bevor/nach Einbau des Sandungssystems

Quelle: (Bombardier Inc., 2008a, S. 7)

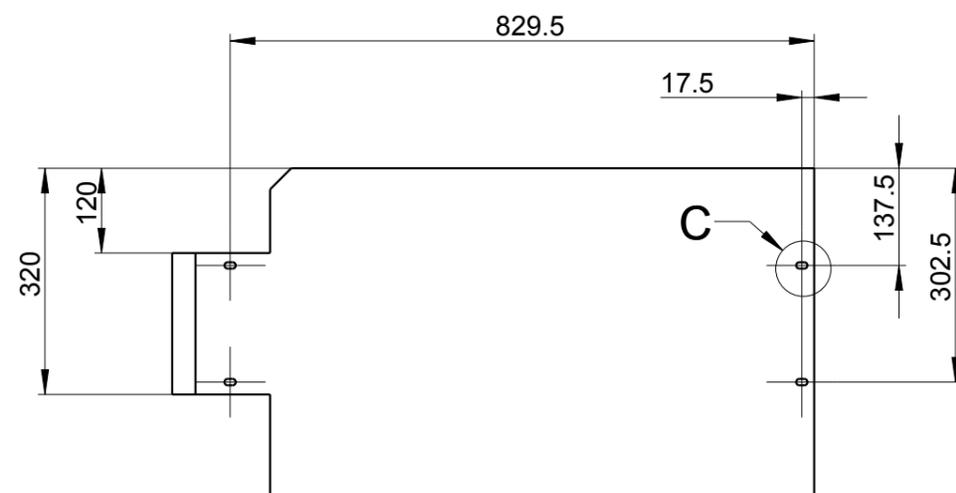
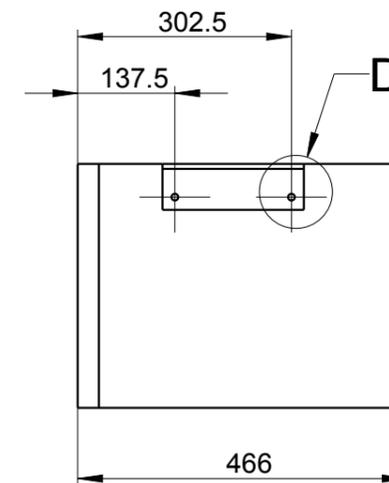
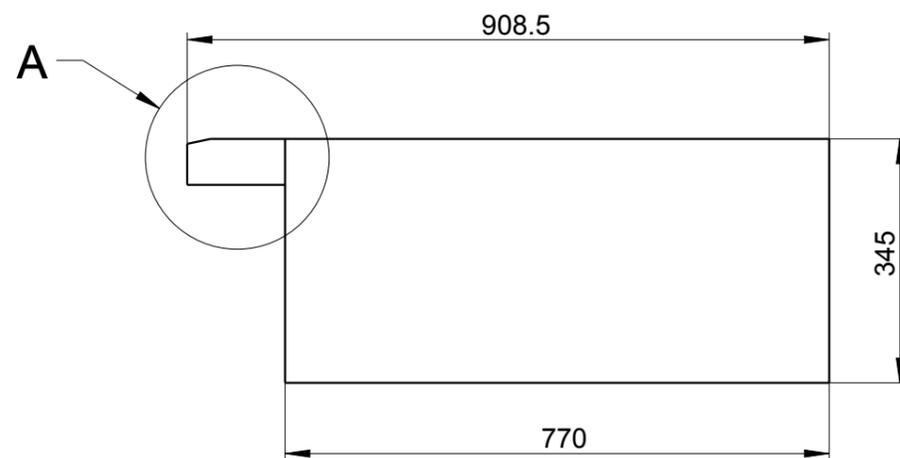
Bei den Achsen 2 und 9 wird das Sandungssystem ebenfalls als Kiste ausgeführt und in den Schienen in Seitenwand und Fußboden befestigt. Statt der Sitze wird an der Oberseite ein Gepäckregal montiert.

Den detaillierten - vom Fahrzeugbetreiber vorgegebenen - Einbauraum, mit den Schnittstellen zum Fahrzeug und zum Sitzrahmen bzw. Gepäckregal, zeigt Abbildung 25. Die Geometrie wurde als 3D-Modell (Step-File) zur Verfügung gestellt und daraus die Zeichnung abgeleitet. Das gesamte Sandungssystem, inklusive Sandkasten und Sandungsanlage, muss darin untergebracht werden. Dabei wird gemäß Lastenheft ein Sandvolumen von mindestens 17 Liter gefordert. Die Sandungsanlage muss so hoch angeordnet sein, dass der Sandschlauch ohne Probleme durch den Ausschnitt im Bodenprofil (gelber Bereich, links in Abbildung 24) geführt werden kann. Die Druckluftversorgung erfolgt ebenfalls durch diese Öffnung im Bodenprofil. Außerdem sind die gesamte Kiste und der Ausschnitt für die Schlauchdurchführung gegenüber dem Fußboden und der Seitenwand abzudichten, so dass bei der Nassreinigung kein Wasser in die Seitenwand und den Fußboden gelangen kann (Bombardier Inc., 2008a, S. 4ff).

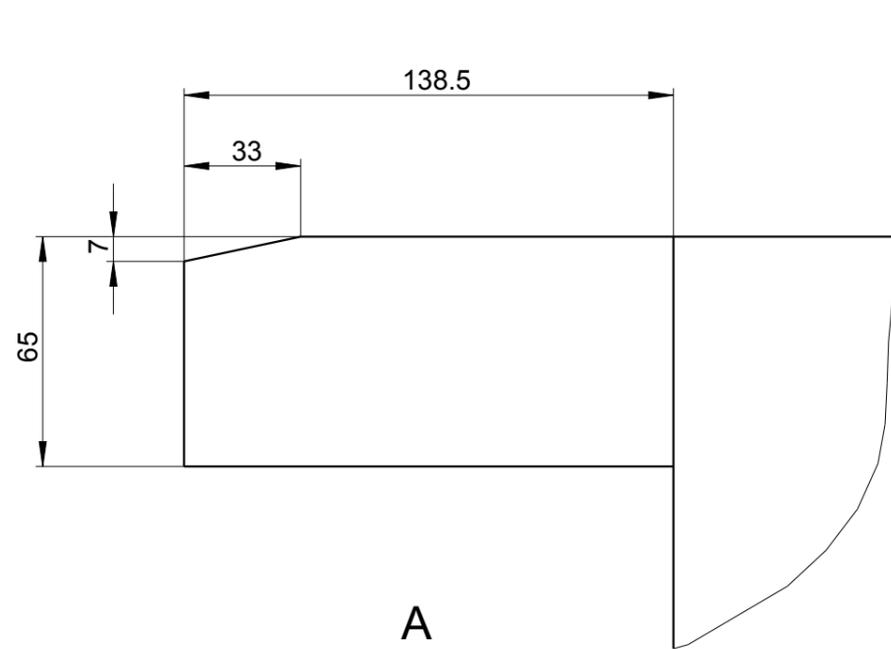
Da der nachträgliche Einbau von Einfüllklappen in der Fahrzeugaußenwand als zu aufwändig erscheint, soll die Befüllung im Fahrzeuginneren erfolgen. Dazu wird jeweils eine Einfüllklappe für automatische Befüllung an der Gangseite der Sitzkiste angebracht. Weiters muss die Kiste so gestaltet werden, dass die Frontseite abgenommen werden kann. Das ist notwendig, um die Zugänglichkeit zur Sandungsanlage für etwaige Einstell- und Wartungsarbeiten zu gewährleisten. Außerdem ist ein Revisionsdeckel an der Oberseite vorgesehen, um in den Sandbehälter und zu der im Sandbehälter angebrachten Sandstandsanzeige zu gelangen (Krismanic, 2008, S. 3ff).



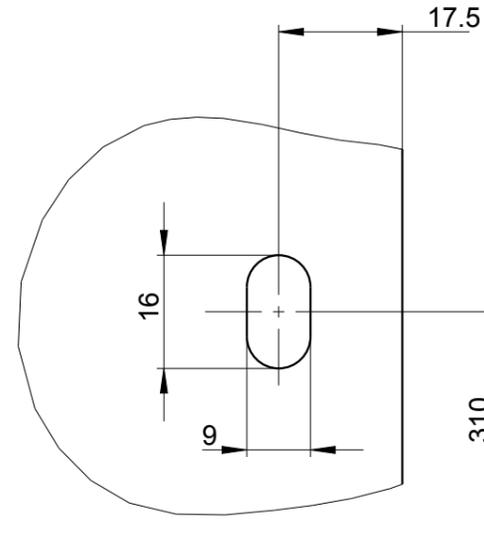
Isometrische Ansicht



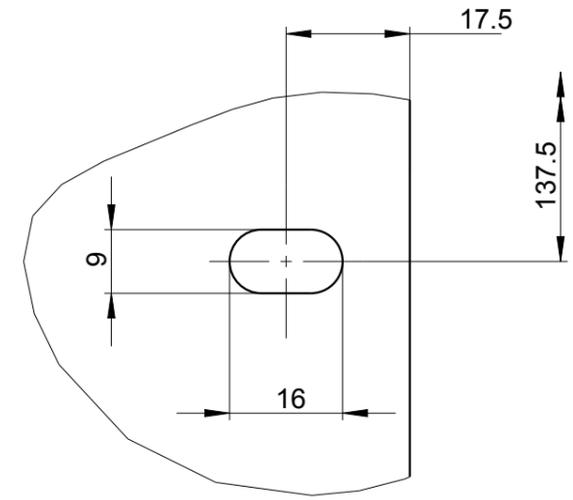
Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	Projekt Schnellbahn	Matr.nr.:	0126058
<b>1:10</b>	<b>Einbauraum mit Anschlusspunkten</b>	Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
	TU Wien	Abbildung 25	Blatt 1 von 2
		Abgabedatum:	2015



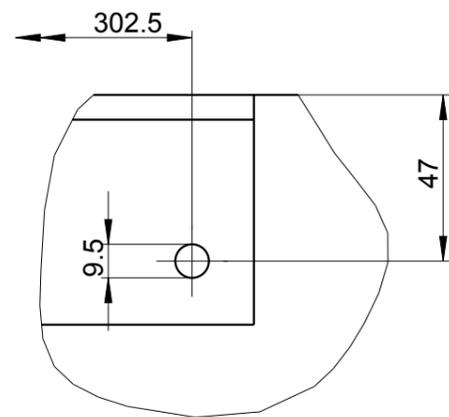
**A**  
1:2



**B**  
1:1



**C**  
1:1



**D**  
1:2

Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:  <b>1:10</b>	Projekt Schnellbahn	Matr.nr.:	0126058
	<b>Einbauraum mit Anschlusspunkten</b>	Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
	TU Wien	Abbildung 25	Blatt 2 von 2
		Abgabedatum:	2015

## 4.2 Das Straßenbahnprojekt

Bei diesem Projekt handelt es sich um die Entwicklung einer neuen Plattform für Straßenbahnfahrzeuge. Die Fahrzeuge werden als Kurz- und Langversion und für Ein- und Zweirichtungsbetrieb erhältlich sein (Bombardier Transportation, 2008b, S. 8).

Die Langversion besteht aus 7 Modulen und besitzt insgesamt 4 konventionelle Fahrwerke mit jeweils zwei Radsätzen. Davon sind 3 Triebfahrwerke. Die Kurzversion besteht aus 5 Modulen mit 3 Fahrwerken, davon 2 Triebfahrwerke. In der Abbildung 26 ist das Fahrzeugschema der Kurzversion für Zweirichtungsbetrieb dargestellt. Das mittlere Fahrwerk ist das Laufwerk. Sandungssysteme werden beim Zweirichtungsfahrzeug an allen Achsen der Triebfahrwerke eingerichtet (in Abbildung 26 in Lila eingezeichnet). Für das Zweirichtungsfahrzeug in der Kurzversion werden also 8 Sandungssysteme benötigt. Für die eine Fahrtrichtung werden dann die Achsen 1 und 5 gesandet, für die andere Richtung die Achsen 6 und 2 (Bombardier Transportation, 2008b, S. 8ff).

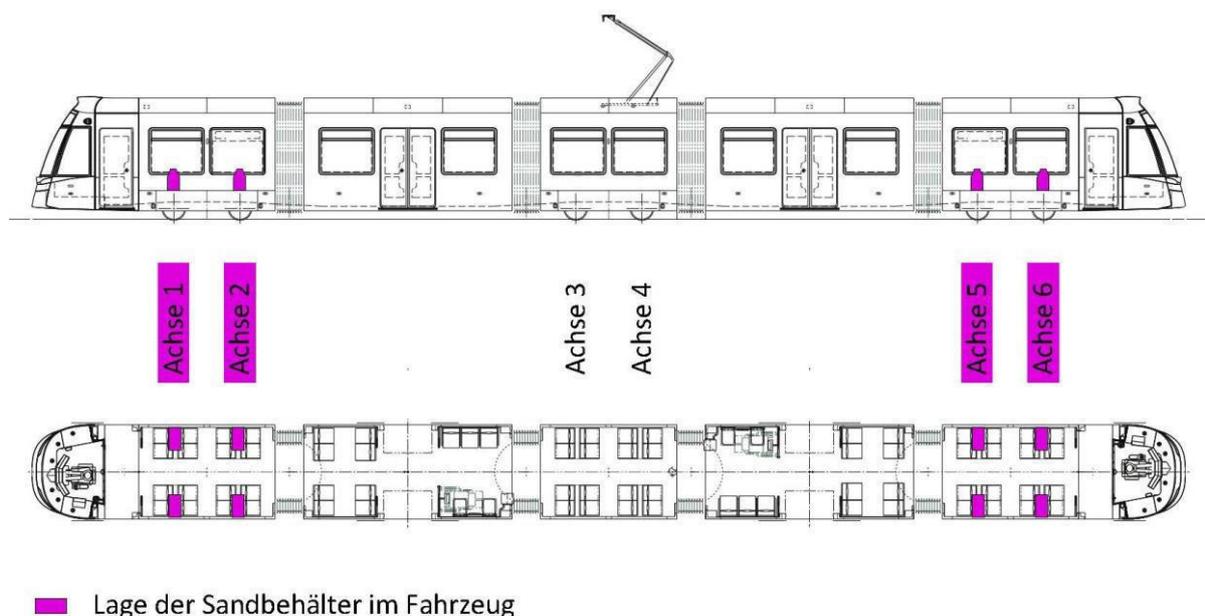


Abbildung 26: Anordnung der Sandkästen, Straßenbahnprojekt Kurzversion

Quelle: (Bombardier Transportation, 2009b, S. 2)

### 4.2.1 Grundlagen des Sandungssystems

In der folgenden Auflistung werden die wichtigsten Merkmale, Eckdaten, die geforderten Funktionen und die gewünschte Ausstattung der Sandungssysteme zusammengefasst (sämtliche Punkte stammen aus (Bombardier Transportation, 2008b)):

- gefordertes Sandvolumen: mindestens 20 l
- maximale Masse eines Sandungssystems inklusive aller Komponenten: 27,5 kg

- Stückzahlen: deutlich über 1.000 Stück bzw. mehrere 100 Stück pro Jahr erwartet
- Einfüllklappe für automatische Befüllung in der Fahrzeugaußenwand
- Eine Sandstandsanzeige pro Sandkasten
- Druckluftversorgung durch einen Kleinverdichter pro Sandungsanlage (wartungsfreier, trockenlaufender Verdichter mit Luftansaugfilter, Versorgungsspannung 24 V Gleichstrom)
- geschwindigkeitsabhängige Regulierung der Sandstreuemenge
- Sandfördermenge einstellbar zwischen 300 und 1800 g/30s
- Ausblasfunktion erforderlich, da der Sandschlauch nach der Sandungsanlage waagrecht bzw. leicht schräg verläuft.
- Verwendung von Sandrohrheizungen
- Trocknungsfunktion
- Sandspezifikation nach DB-Norm BN918224
- Klimazone Mitteleuropa, Temperatur -25°C bis +50°C
- Werkstoff der Kästen: Metall (nichtrostender Stahl oder Aluminium) oder Kunststoff ohne Lackierung

#### 4.2.2 Mechanische Konstruktion

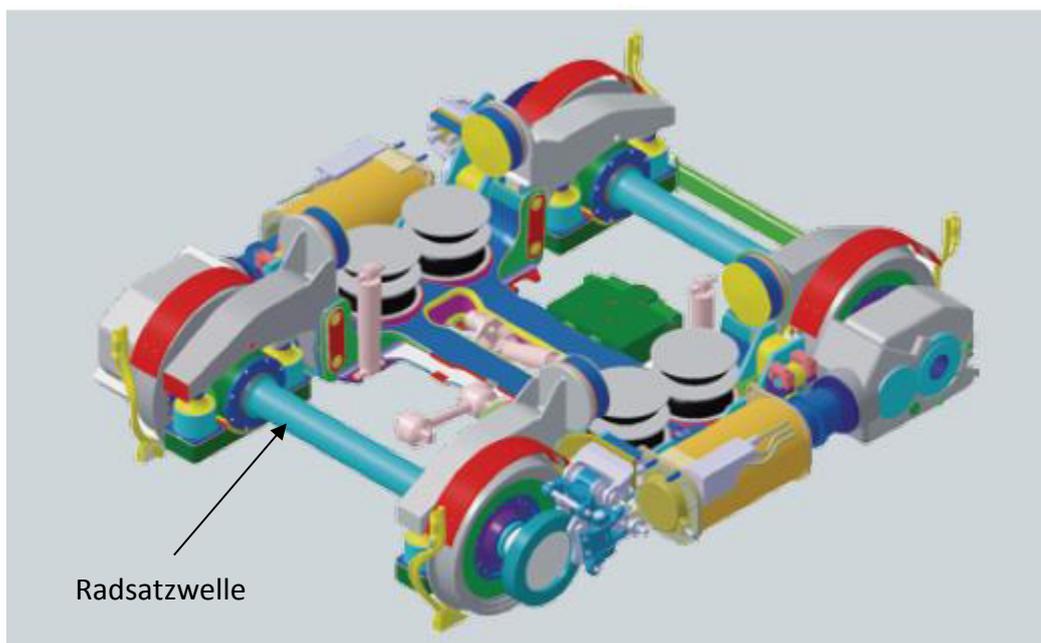


Abbildung 27: Triebfahrwerk für das Straßenbahnprojekt

Quelle: (Bombardier Transportation, 2009a, S. 11)

Das Fahrzeug ist als 100%-Niederflur-Fahrzeug konzipiert. Das heißt, es hat einen durchgehend niedrigen Mittelgang ohne Stufen - auch über den Fahrwerken. Die Abbildung 27 zeigt die verwendeten Triebfahrwerke. Im Bereich des Gangs bildet die Radsatzwelle (blau) den höchsten Punkt des Fahrwerks, sodass der Fußboden möglichst tief angeordnet werden

kann. Motor, Getriebe und Bremsen werden außen am Fahrwerk montiert und müssen kompakt angeordnet werden. Es ist ersichtlich, dass die Sandungssysteme aus Platzgründen nicht am Fahrwerk angebracht werden können. Auch an der Unterseite des Wagenkastens bietet sich auf Grund der geringen Höhe kein Platz. Also müssen die Sandungseinrichtungen im Wageninneren untergebracht werden (Bombardier Transportation, 2009a, S. 11).

Abbildung 28 zeigt die Sitzkonfiguration über den Triebfahrwerken. Als Einbauraum für die Sandungssysteme bietet sich der in der Abbildung lila eingefärbte Bereich an. Die Sitzgruppe direkt über dem Fahrwerk ist angehoben, da in diesem Bereich auch der Fußboden seitlich vom Gang angehoben werden muss, weil sich direkt darunter die Räder befinden. So ergibt sich im Raum zwischen den Rückenlehnen zweier Sitzreihen und unterhalb der angehobenen Sitze Platz für den Einbau der Sandungssysteme. Die Konstruktion muss an die angrenzenden Baugruppen des Fahrzeuges (Sitze, Radkasten, Radkasten-Durchführung, Seitenwand) angepasst werden. Der Einbauraum ist bei der Kurz- und bei der Langversion der gleiche, allerdings sind zwei verschiedene Ausführungen für links und rechts bzw. erste und zweite Achse erforderlich. Den genauen vom Fahrzeugbetreiber vorgegebenen Einbauraum mit Abmessungen zeigt Abbildung 29.

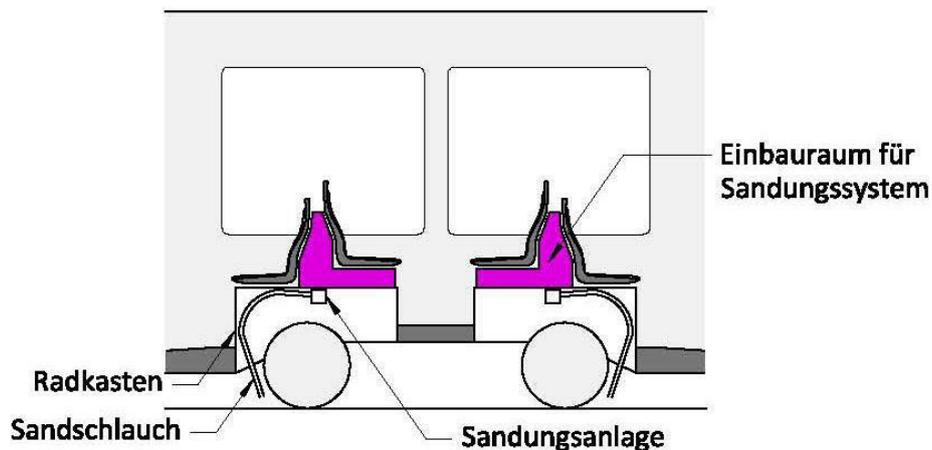
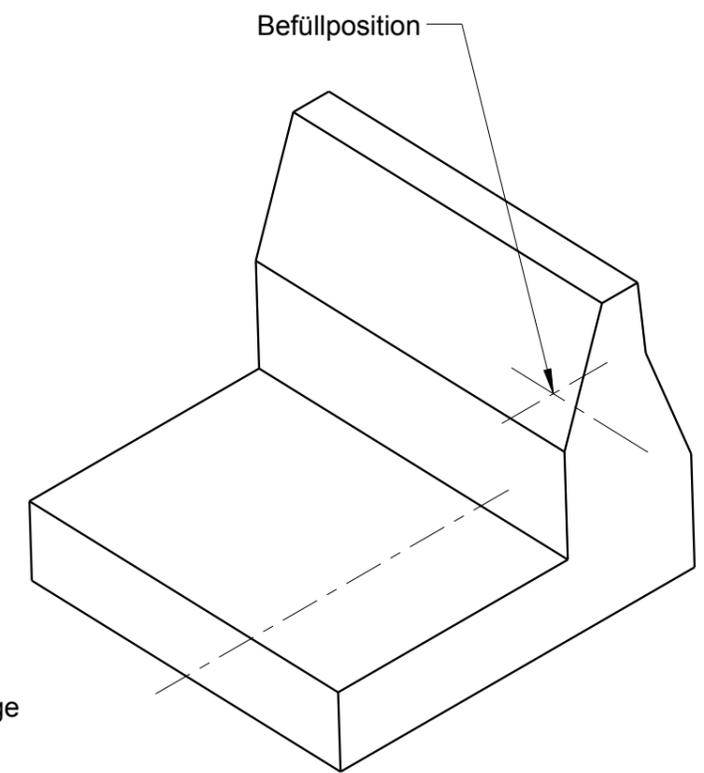
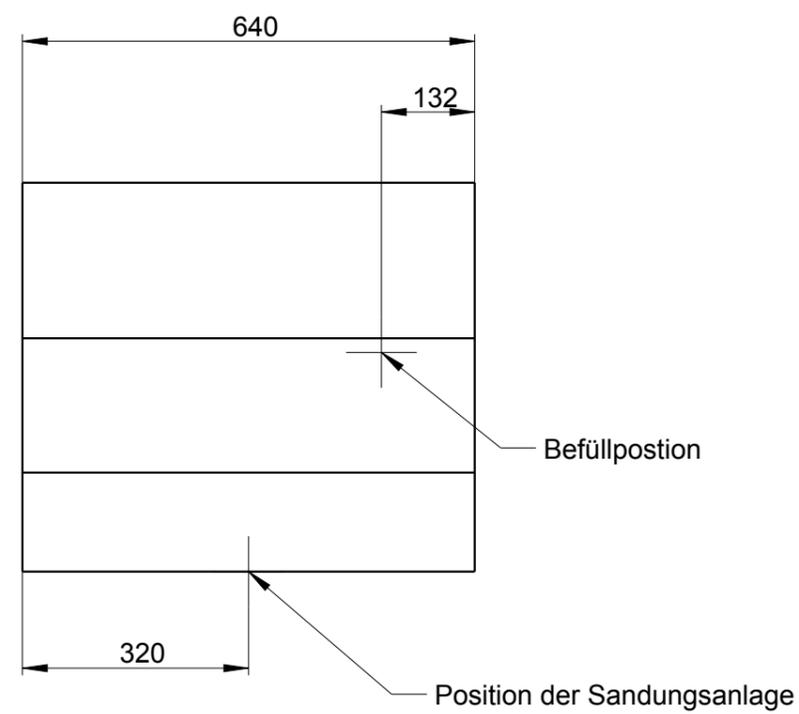
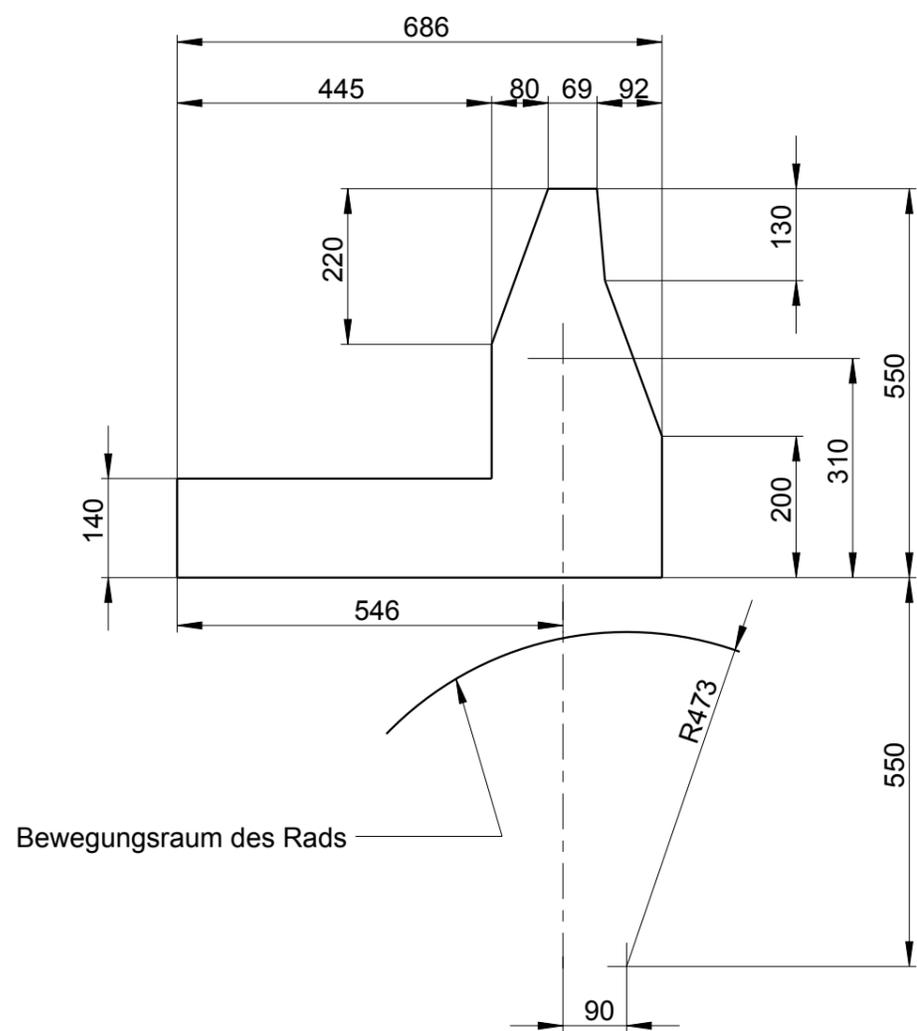


Abbildung 28: Platzierung der Sandungsanlagen beim Straßenbahnprojekt

Besonders interessant bei diesem Projekt ist, dass der gegebene Einbauraum bei Bedarf nach unten erweitert werden kann. Der Fahrzeugboden/Radkasten kann also durchbrochen werden, sodass sich z.B. die Sandungsanlage im Freien befindet. In diesem Fall ist die Trocknungsfunktion erforderlich. Allerdings muss darauf geachtet werden, dass der Bewegungsraum des Rades freigehalten wird. Außerdem muss der Radkastendurchbruch gut abgedichtet werden (Bombardier Transportation, 2009a, S. 12).



Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	Projekt Straßenbahn	Matr.nr.:	0126058
	<b>Einbauraum</b>	Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
	<b>1:10</b>	Abgabedatum:	2015
	TU Wien	Abbildung 29	Blatt 1 von 1

Das gesamte Sandungssystem soll als eine Einheit ein- und ausgebaut werden können. Daher wird die Konstruktion auf einer Grundplatte bzw. einem Grundrahmen aufgebaut. Die einzelnen Komponenten sind entweder direkt auf dem Rahmen oder am Sandkasten montiert. Diese gesamte vormontierte Baugruppe wird dann auf dem Radkasten und gegebenenfalls mit der Seitenwand verschraubt. Weiters ist bei der Konstruktion darauf zu achten, dass auch ein Verdichter und eine elektrische Anschlussleiste in das System integriert werden müssen (Bombardier Transportation, 2008b, S. 8f).

Die Befüllung erfolgt über Einfüllklappen in der Fahrzeugaußenwand mittels automatisierter Befüllungsanlagen (siehe dazu Kapitel 2.6). Sowohl Einfüllklappe als auch –stützen gehören zum Lieferumfang. Die Einfüllklappe muss dabei an die vom Fahrzeughersteller vorgegebene Mulde angepasst werden (Bombardier Transportation, 2008b, S. 9f).

An der Oberseite des Sandkastens ist ein Revisionsdeckel vorzusehen. Dieser soll so ausgeführt werden, dass er bei Bedarf durch eine Innenbefüllklappe ersetzt werden kann. Das Sandungssystem wird im Innenraum mit einer Verkleidung versehen. Sowohl diese Verkleidung als auch die Sandschläuche gehören nicht zum Lieferumfang sondern werden vom Fahrzeughersteller bereitgestellt (Bombardier Transportation, 2008b, S. 11f).

## 5 Fertigungsverfahren

In diesem Kapitel wird zunächst dargestellt, wie Sandbehälter üblicherweise konstruiert und hergestellt werden. Anschließend werden verschiedene Kunststoffverarbeitungsverfahren vorgestellt, die für die Herstellung von Sandbehältern geeignet erscheinen. Für jedes Verfahren werden die üblicherweise verwendeten Kunststoffe aufgezählt und der Fertigungsprozess sowie der prinzipielle Aufbau der Werkzeuge beschrieben, soweit dies für die kosten-technische Beurteilung nötig ist. Am Ende des Kapitels gibt es eine Zusammenfassung in Form einer Tabelle, in der die wichtigsten Merkmale der einzelnen Herstellungsverfahren - im Hinblick auf die Herstellung von Sandbehältern - gegenüber gestellt werden. Abschließend erfolgt eine Vorauswahl von Verarbeitungsverfahren, die in Kapitel 6 weiter behandelt werden.

Die Herstellung von Hohlkörpern ist in der Kunststoffverarbeitung prinzipiell durch folgende Verfahren möglich (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 69):

- Extrusionsblasformen
- Spritzblasformen
- Rotationsformen
- Wickeln
- Zusammenbau zweier Schalen (hergestellt z.B. durch Spritzgießen oder Pressen)

In diesem Kapitel werden solche Verfahren vorgestellt, die zur Herstellung von Sandkästen technisch möglich und sinnvoll erscheinen. Es werden existierende vergleichbare Produkte und deren Einsatzbereiche aufgezählt. So kann abgeschätzt werden, ob das jeweilige Fertigungsverfahren geeignet ist und die so gefertigten Sandkästen den erwarteten Belastungen standhalten können.

Bei der Verarbeitung von Kunststoffen sind generell folgende Gestaltungsrichtlinien zu beachten (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 110ff):

- Wanddicken so klein wie möglich:  
Bei großen Wanddicken besteht die Gefahr einer unkontrollierten Schwindung. Außerdem wird durch die lange Kühlzeit/Härtezeit die Wirtschaftlichkeit verringert.
- möglichst gleiche Wanddicken, keine Wanddickensprünge, keine Masseanhäufungen:  
Unterschiedliche Wanddicken und Masseanhäufungen führen zu unterschiedlichen Abkühlbedingungen und ungleichmäßiger Schwindung. Dadurch können Verzug und Einfallstellen entstehen.

- keine scharfen Ecken und Kanten, möglichst große Radien:  
Bei scharfen Ecken wird die Außenseite des Formteils auf Grund der größeren Oberfläche stärker gekühlt als die Innenseite. Das führt zu inneren Spannungen, Verzug und Vakuolen.
- Hinterschneidungen vermeiden:  
Hinterschneidungen erfordern eine aufwändigere Konstruktion des Werkzeugs, um die Entformung zu ermöglichen.

## 5.1 Stand der Technik

Derzeit werden Sandbehälter überwiegend aus Stahlblechen oder Aluminium gefertigt. Auf Grund der geringen Stückzahlen erfolgt dies meist in Handarbeit. Außerdem gibt es ein relativ neues Patent der Firma Siemens, welches Sandbehälter aus Kunststoff, jedoch eingebaut in einen stabilisierenden Metallrahmen, beschreibt. Diese beiden Konstruktionsformen werden nun nachfolgend detaillierter beschrieben.

### 5.1.1 Schweißkonstruktion aus Stahl- oder Aluminiumblechen

Abbildung 30 zeigt die Einzelteile eines Sandkastens, wie er von der Firma Knorr-Bremse in einem bestimmten Projekt verbaut wurde. Daraus lässt sich die Vielzahl an einzelnen Blechteilen erkennen, die für die Konstruktion benötigt werden. Dies führt zu einer arbeitsaufwändigen Fertigung, da sämtliche Teile zunächst vorgefertigt werden müssen, bevor sie in Handarbeit verschweißt werden. Auf Grund zu geringer Stückzahlen ist das Verschweißen kaum voll automatisierbar. Außerdem müssen alle Schweißnähte aus Korrosionsgründen nachbehandelt werden und der Verzug bei längeren, durchgehenden Schweißnähten bereitet ebenfalls Probleme.

Von der gewünschten endgültigen Form ausgehend wird überlegt, wo man die Konstruktion am günstigsten in einzelne Teile auftrennt, um eine möglichst einfache Fertigung zu gewährleisten. Dann müssen die Details ausgearbeitet werden und für jedes einzelne Teil eine Herstellungszeichnung erstellt werden. Schließlich folgt eine Zusammenstellungszeichnung mit Stückliste.

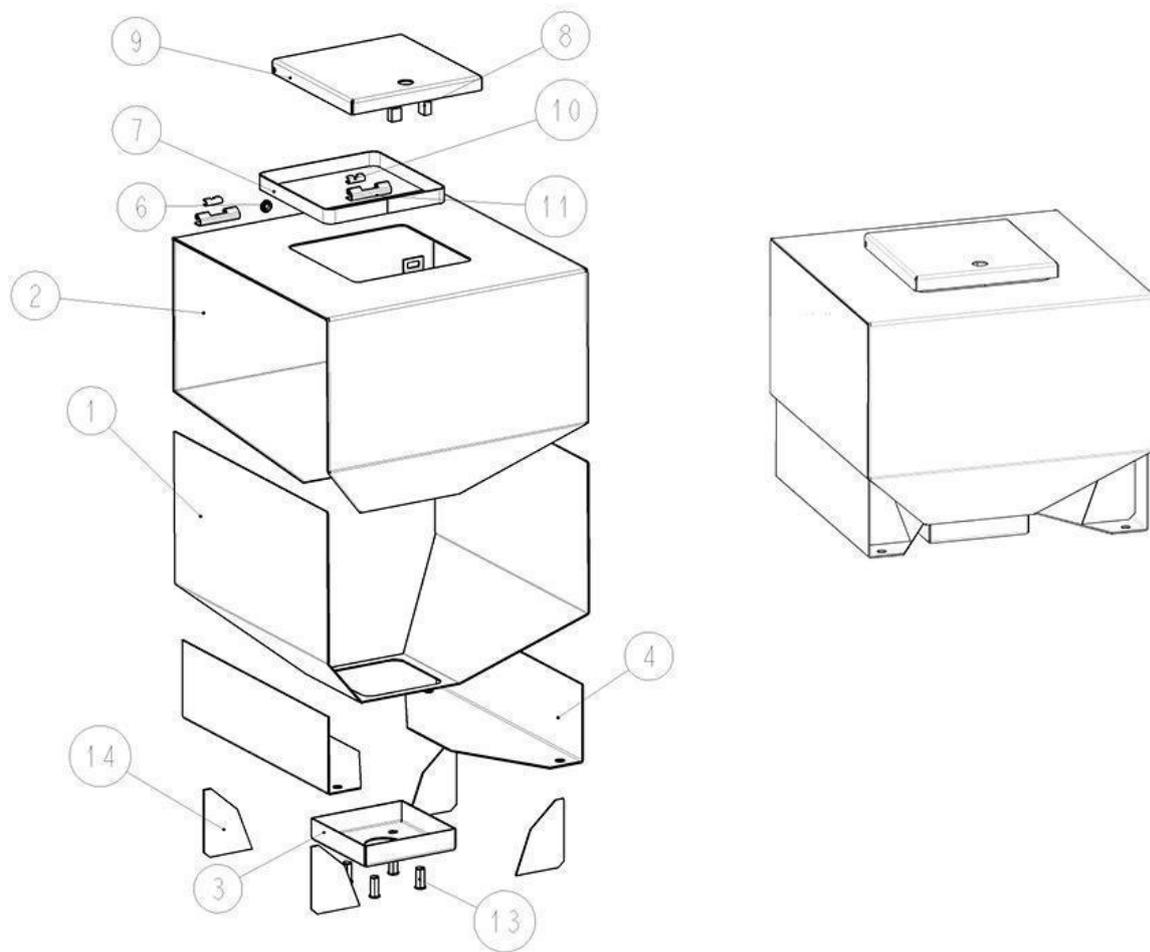


Abbildung 30: Schweißkonstruktion, Einzelteile und Zusammenbau

Quelle: Knorr-Bremse

Die Vor- und Nachteile von Blechkonstruktionen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Vorteile	Nachteile
Mechanische Belastbarkeit	Aufwändige Konstruktion und Fertigung
Langlebigkeit	Gewicht
Flexibel in Planung, Konstruktion und Fertigung	Keine Massenfertigung
Einzelfertigung kostengünstig möglich	Lange Lieferzeiten bei größeren Stückzahlen
Brand- und Sicherheitstechnisch unbedenklich	

Tabelle 3: Vor- und Nachteile der Schweißkonstruktion

### 5.1.2 Kunststoffbehälter nach Patent SIEMENS

2011 beantragte die Firma Siemens unter dem internationalen Aktenzeichen PCT/EP2011/059387 die Eintragung eines Patents unter der offiziellen Bezeichnung „Kunststoffsandkasten für Lokomotiven“ (Anmeldedatum 7.6.2011) (Siemens Aktiengesellschaft, 2011).

Der gesamte Sandbehälter (Fig. 5 in Abbildung 31) besteht dabei aus zwei Teilen: einerseits dem eigentlichen Sandkasten aus Kunststoff (Fig. 3 in Abbildung 31) und andererseits einem Traggerüst aus Metall (Fig. 4 in Abbildung 31). Diese Konstruktion soll sowohl leichter sein als auch einfacher und kostengünstiger herstellbar als geschweißte Metallbehälter.

Diese Systeme sollen bei Lokomotiven außerhalb des Wagenkastens im Unterflurbereich angebracht werden. Das Füllvolumen beträgt in der Regel 60 l. Die Sandbehälter sollen auf einfache Art und Weise an unterschiedlichen Lokomotiven befestigt werden können und einen einfachen Austausch alter Sandbehälter ermöglichen (Siemens Aktiengesellschaft, 2011, S. 3).

Der zur Anwendung gelangende Kunststoff ist quervernetztes Polyethylen, welches eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber Steinschlag und Stoßbelastungen und hohe Brandfestigkeit gewährleistet. Über das Fertigungsverfahren des Kunststoffsandkastens werden in der Patentschrift keine Angaben gemacht (Siemens Aktiengesellschaft, 2011, S. 4).

Abbildung 31 zeigt ein Beispiel eines solchen Systems. Vorteilhafterweise ist der Kunststoffsandkasten formschlüssig mit dem Traggestell verbunden und nur im unteren Bereich verschraubt. So werden Verspannungen vermieden und eine einfache Montage ermöglicht. Gleichzeitig dienen die großen Metallflächen auf Vorder- und Rückseite des Traggestells als mechanischer Schutz für den Kunststoffbehälter (Siemens Aktiengesellschaft, 2011, S. 8).

Neben den aufgezeigten Vorteilen hat diese Konstruktion aber auch einige Nachteile:

- Der Gewichtsvorteil der Kunststoffkonstruktion wird durch das Traggestell teilweise aufgehoben.
- Der gesamte Kostenvorteil gegenüber der herkömmlichen Konstruktionsart erscheint verhältnismäßig gering. Die Herstellung des Traggerüsts wird im Vergleich zu einem vollständigen metallischen Sandkasten in etwa halb so viel kosten, zusätzlich wird noch ein eigener Kunststoffbehälter benötigt.

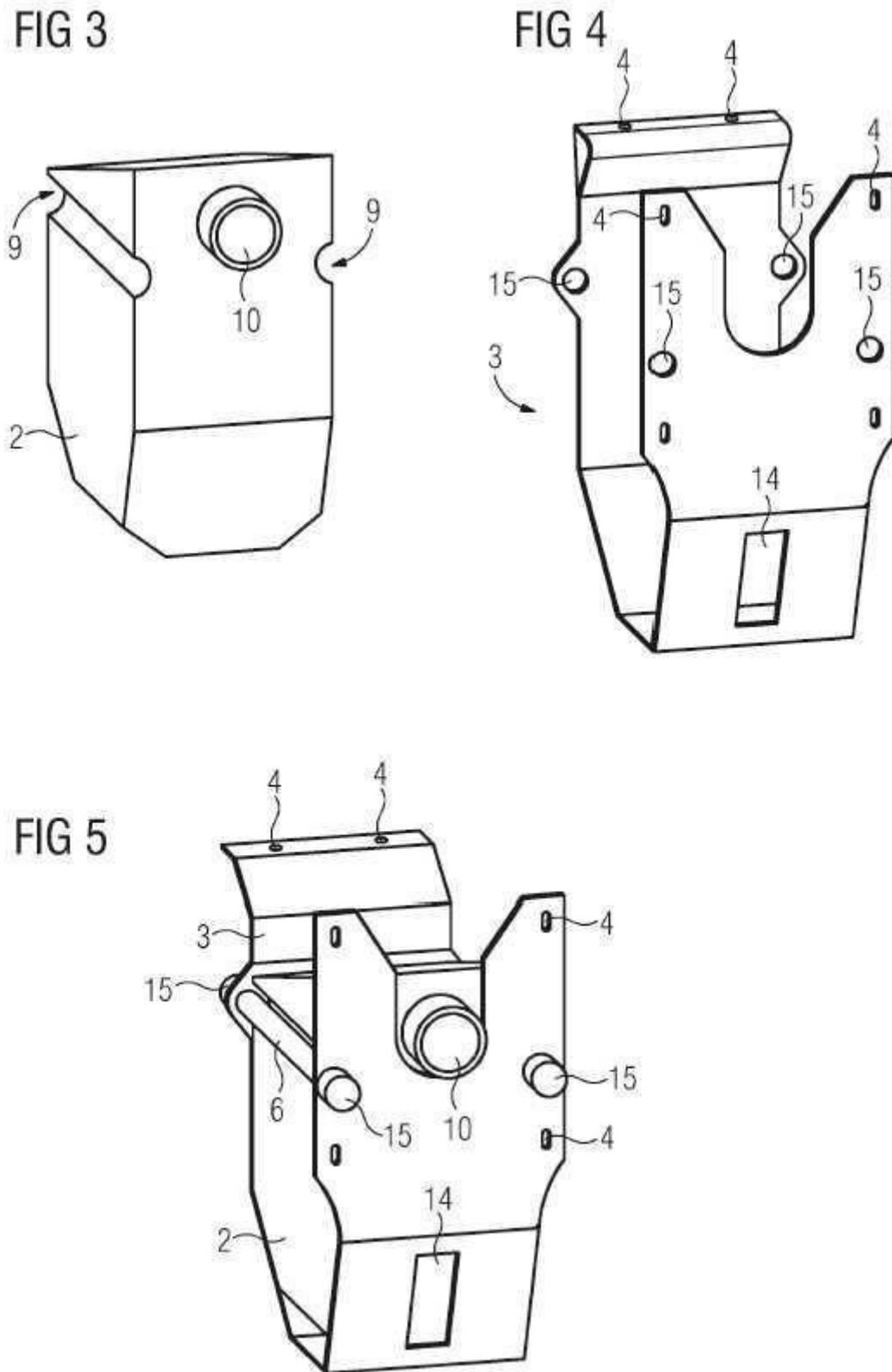


Abbildung 31: Sandkasten nach Patent SIEMENS, Auszug aus der Patentschrift  
 Quelle: (Siemens Aktiengesellschaft, 2011, S. 15)

## 5.2 Spritzgießen

Spritzgießen ist das am häufigsten verwendete Kunststoffverarbeitungsverfahren. Es zeichnet sich durch einen hohen Automatisierungsgrad und üblicherweise große Stückzahlen - häufig auch Massenfertigung - aus. Die Werkzeugkosten sind im Vergleich zu anderen Herstellungsverfahren hoch. Wirtschaftlich ist das Verfahren im Allgemeinen deshalb erst ab ca. 10.000 Stück, in Sonderfällen aber auch schon ab rund 3.000 Stück, je nach Komplexität und Größe des Formteils und je nach Werkzeugaufwand (Mennig, 2008, S. 1f). Das entspricht gerade noch der Größenordnung der zu erwartenden Stückzahlen der vorliegenden Projekte.

### 5.2.1 Fertigungsprozess

Im Spritzgießverfahren können sowohl Thermoplaste als auch Duroplaste und Elastomere verarbeitet werden. Die folgenden Erläuterungen beziehen sich auf die Verarbeitung von Thermoplasten, da diese am häufigsten verwendet werden und deshalb die größte Bedeutung für die Spritzgusstechnik haben. Als Ausgangsstoff kommt der Kunststoff in Granulat- oder Pulverform zur Anwendung. Es können auch verschiedene Zusatzstoffe beigemischt werden, z.B. zum Einfärben oder zur Verstärkung des Materials. Vor der Verarbeitung muss die Formmasse getrocknet werden, sonst verdampft die Feuchtigkeit bei den hohen Verarbeitungstemperaturen. Dadurch können sich Blasen auf der Formteiloberfläche bilden und die mechanischen Eigenschaften verschlechtert werden (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 89). Um hochwertige Spritzgussteile zu erhalten, müssen außerdem die für die Verarbeitung relevanten Eigenschaften des jeweiligen Werkstoffs berücksichtigt werden. Dazu zählen z.B. das Fließverhalten und die Viskosität der Schmelze, das Erstarrungsverhalten und die Schwindung (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 105).

Beim Spritzgießprozess wird zunächst die Formmasse in der Spritzgießmaschine plastifiziert und homogenisiert. Die für den jeweiligen Zyklus dosierte Schmelze wird dann unter hohem Druck in den Werkzeughohlraum eingespritzt. Dort erstarrt die Schmelze unter Nachdruck durch Abkühlen. Nach Ablauf einer bestimmten Kühlzeit wird das fertige Bauteil schließlich entformt. Der Prozess zeichnet sich durch einen periodischen Ablauf aus (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 81f).

Abbildung 32 zeigt das Schema des Spritzgießens. Die wichtigsten Bestandteile einer Spritzgießmaschine sind die Spritzeinheit und die Schließeinheit. Die Aufgaben der Spritzeinheit sind das Plastifizieren der Formmasse und das anschließende Einspritzen der Schmelze in das Werkzeug. Die Schließeinheit nimmt die beiden Werkzeughälften auf und schließt und öffnet diese (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 82).

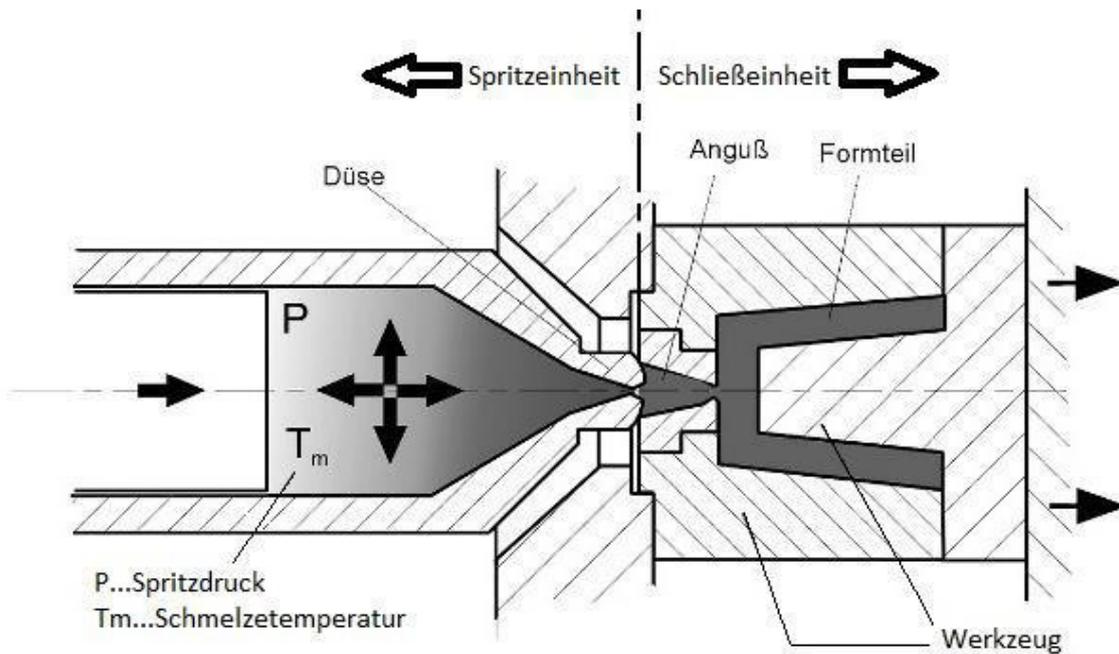


Abbildung 32: Schema des Spritzgießens

Quelle: (Eyerer, Hirth, & Elsner, 2008, S. 218)

Meist ist keine Nachbearbeitung der Teile notwendig. Auch komplexe Elemente wie Gewinde, Scharniere, Schnappverbindungen, Federelemente oder Hinterschneidungen sind in einem Arbeitsgang herstellbar. Es können einerseits sehr kleine Teile wie z.B. Zahnräder für Uhren, andererseits auch große Teile wie z.B. Mülltonnen oder Bootskörper hergestellt werden. Der Gewichtsbereich reicht dabei von wenigen Milligramm bis 50 kg oder mehr (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 81).

Die Formteilgeometrie hat großen Einfluss auf die Eigenschaften des Spritzgussteils. Vor allem die Wanddicke und Wanddickenunterschiede sowie die Fließweglängen sind verantwortlich für die Abkühlbedingungen des Formteils. Durch unterschiedliche Abkühlbedingungen kann es zu inneren Spannungen und zum Verzug des Bauteils kommen (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 105).

## 5.2.2 Werkzeuge

Die Werkzeuge für das Spritzgießen sind im Vergleich zu anderen Verfahren sehr teuer. Beim Spritzgießprozess treten im Werkzeuginneren Drücke von mehreren 100 bar auf, dadurch wirken große Kräfte auf die Werkzeugwände. In der Konstruktion wird oft mit einem Mittelwert von 1.000 bar gerechnet. Daher muss das Werkzeug eine große Steifigkeit und Festigkeit aufweisen, um nicht verformt zu werden und den Belastungen standhalten zu können. Für die Serienfertigung kommen daher nur Werkzeuge aus Stahl in Frage. Diese hohen Drücke sind nötig, um dem Schwinden des Materials entgegenzuwirken (Mennig, 2008, S. 3f).

Das Spritzgießwerkzeug besteht aus einer festen und einer beweglichen Werkzeughälfte. Die einzelnen Bauteile des Werkzeugs sind als standardisierte Normalien erhältlich, sodass nur die Formplatten mit der formgebenden Kavität individuell hergestellt werden müssen. Die Aufgaben des Werkzeugs sind es, die Kunststoffmasse zu leiten und formen, zu kühlen und schließlich das fertige Bauteil zu entformen (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 90f).

Einen erheblichen Einfluss auf die Formteileigenschaften und die Zykluszeit hat die Werkzeugtemperierung (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 103). Deren Ziele sind:

- eine möglichst konstante Werkzeug-Oberflächentemperatur. D.h. der Temperaturunterschied zwischen dem Einspritzen der Schmelze (heiß) und dem Entformen des Bauteils (kalt) soll möglichst gering sein (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 89).
- rasche und gleichmäßige Wärmeabfuhr über die gesamte Bauteiloberfläche. Ein effektiver Wärmeaustausch führt zu einer kurzen Zykluszeit und erhöht dadurch die Wirtschaftlichkeit (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 89).
- gleichmäßige Temperatur auf gesamter Oberfläche (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 89)

Auch die Anordnung der Angusskanäle beeinflusst die Formteileigenschaften wesentlich. Die Anschnittlage ist ausschlaggebend für die die Füllung des Werkzeughohlraums, die Fließweglängen und Orientierungen im Bauteil. Beim Fließen der Schmelze werden die Moleküle in Fließrichtung ausgerichtet. Beim Abkühlen und Erstarren bleiben diese Orientierungen bestehen und führen zu einer Anisotropie des Formteils. Die Anschnittlage bestimmt die Richtung der Orientierungen. Außerdem muss die Lage so gewählt werden, dass es beim Füllen der Kavität zu keinen Lufteinschlüssen kommt. (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 104ff).

### **5.2.3 Fazit**

Die Anwendungsbereiche wie z.B. Müllcontainer und Bootskörper zeigen, dass das Spritzgussverfahren aus technischer Sicht wohl geeignet wäre für die Herstellung von Sandkästen. Wie bereits eingangs erwähnt, eignet sich dieses Verfahren jedoch speziell für große Stückzahlen, nur in Sonderfällen ist es schon ab ca. 3.000 Stück rentabel. Dies trifft aber für die Herstellung von Sandkästen nicht zu, da großflächige, dünnwandige Bauteile sehr aufwändige Werkzeuge erfordern. Somit ist die Fertigung von Sandkästen im Spritzgussverfahren nicht wirtschaftlich.

## 5.3 Pressen (inkl. SMC, GMT<sup>1</sup>)

Das Pressverfahren wird vorwiegend zur Verarbeitung von Duroplasten angewendet. Durch die Fortschritte beim Spritzgießen von Duroplasten hat es zwar an Bedeutung verloren, weist aber unter gewissen Voraussetzungen immer noch Vorzüge auf. Ausschlaggebend für eine wirtschaftliche Anwendung sind die Anforderungen an das Formteil und die Formteilgeometrie. Besonders vorteilhaft ist das Pressen bei der Herstellung von großflächigen, dünnwandigen Bauteilen, die zum Verzug neigen (Mennig, 2008, S. 53). Eigenschaften, die auf Sandkästen sehr gut zutreffen.

In letzter Zeit hat das Pressen von faserverstärkten mattenförmigen Formmassen stark an Bedeutung gewonnen. In dieser Form werden auch immer häufiger Thermoplaste im Pressverfahren verarbeitet. Verwendung finden solche Formteile z.B. in der Automobilindustrie als großflächige Karosserie-, Schutz- und Versteifungsteile und als Verkleidungen. Auch die Fertigung von Sandbehältern ist in diesem Verfahren vorstellbar (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 147).

### 5.3.1 Fertigungsprozess

Bei der klassischen Verarbeitung von Duroplasten im Pressverfahren kommt der Kunststoff als Pulver oder Granulat zur Anwendung. Dabei sind die Füll- und Zuschlagstoffe bereits mit dem Harz imprägniert und das Harz ist zum Teil vorvernetzt. Man spricht dann von einer aufbereiteten Formmasse. Vor der Verarbeitung wird diese exakt dosiert und evtl. vorgewärmt oder vorplastifiziert (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 137ff).

Beim SMC- und beim GMT-Verfahren werden faserverstärkte, flächige Halbzeuge verarbeitet, sogenannte Prepregs. Diese Formmassen bestehen aus Glasfasermatten oder -geweben, die mit reaktionsfähigen Harzen (SMC) oder thermoplastischen Kunststoffen (GMT) imprägniert sind. Der Glasfaseranteil beträgt üblicherweise zwischen 20 und 40 %. Als Matrixmaterial kommen beim SMC hauptsächlich Polyester- und Vinylesterharze zur Anwendung, beim GMT vorwiegend PP und PA<sup>2</sup>. Die Dosierung erfolgt, indem aus den als Bahnen vorliegenden Halbzeugen Zuschnitte möglichst genau auf die Kavität zugeschnitten werden. Vor der Verarbeitung werden diese im Ofen vorgewärmt bzw. vorplastifiziert (Mennig, 2008, S. 69f).

Beim Pressen wird die Formmasse (dosiert, evtl. vorgewärmt oder vorplastifiziert) in das geöffnete, beheizte Werkzeug eingefüllt bzw. die zugeschnittenen Prepregs eingelegt. Beim Schließen des Werkzeugs erweicht die Formmasse und verteilt sich gleichmäßig in der Kavität. Sie wird unter hohem Druck und Temperatur verdichtet. Bei der Verarbeitung von Duro-

---

<sup>1</sup> SMC: Sheet moulding compound, GMT: Glasfasermattenverstärkter Thermoplast

<sup>2</sup> PP: Polypropylen, PA: Polyamid

plasten folgt dann die Härtezeit, während der das Werkzeug weiter beheizt wird und die Formmasse aushärtet. Bei Thermoplasten wird während der Kühlzeit das Werkzeug gekühlt und die Schmelze erstarrt. Anschließend wird das Werkzeug geöffnet und das Formteil entformt (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 142). Abbildung 33 zeigt das Schema eines Presszyklus.

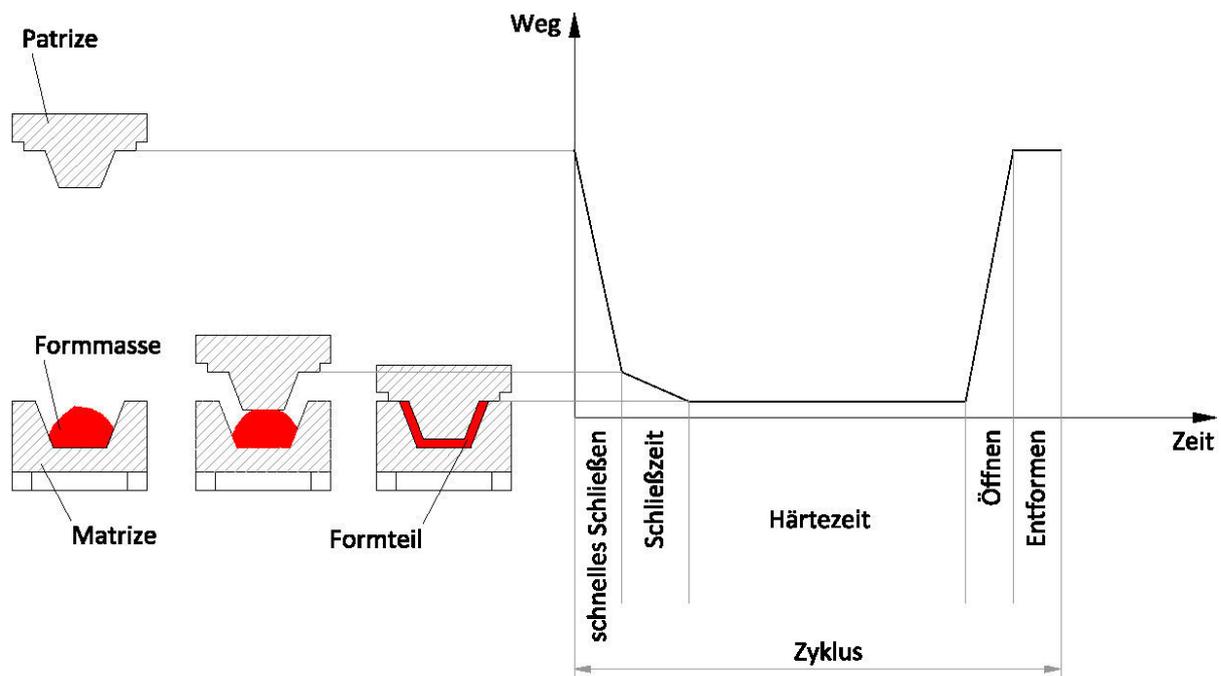


Abbildung 33: Schema des Pressverfahrens

Quelle: (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 141)

Bauteile aus SMC und GMT zeichnen sich durch hohe Festigkeit und Steifigkeit bei geringem Gewicht aus. Abgesehen vom GMT-Verfahren hat das Pressen von Thermoplasten nur geringe Bedeutung. Der Aufwand und die Zykluszeit sind hoch, da das Werkzeug in jedem Zyklus zuerst aufgeheizt und dann gekühlt werden muss. Angewendet wird das Verfahren noch zur Verarbeitung von Kunststoffen mit hohen Molekülmassen und zur Herstellung von dickwandigen Tafeln und Blöcken (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 147).

Nach der Entformung muss das Formteil meist nachbearbeitet werden, da sich beim Pressen eine Gratbildung kaum vermeiden lässt. Die Viskosität der härtbaren Formmassen ist bei der Verarbeitung deutlich geringer als bei Thermoplastschmelzen, sodass die Masse tief in die Werkzeugspalten eindringt. Durch die nötige Nachbearbeitung werden die Fertigungskosten stark beeinflusst, weshalb die Entgratungsmethode im Hinblick auf die Anforderungen an das Formteil und die Stückzahlen berücksichtigt werden muss (Eyerer, Hirth, & Elsner, 2008, S. 362).

### 5.3.2 Werkzeuge

Die Drücke beim Pressverfahren betragen üblicherweise zwischen 50 und 250 bar und die Temperaturen zwischen 140 und 175 °C (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 145). Die Werkzeuge sind also - ähnlich wie beim Spritzgießen - hohen Belastungen ausgesetzt und dürfen sich nur in geringem Maß elastisch verformen. Der Werkzeugkern soll zäh sein, damit bei geringer Verformung keine Schäden auftreten. Außerdem werden die Kavitäten mit einer Politur versehen, um eine gute Entformbarkeit zu gewährleisten. Zusätzlich wird die Werkzeugoberfläche gehärtet oder hartverchromt, da die unter Druck fließenden Formmassen, die meist einen hohen Füllstoffanteil haben, starken Verschleiß verursachen (Mennig, 2008, S. 55f).

Für die formgebenden Werkzeugteile kommen daher warmfeste oder hochvergütete Werkzeugstähle mit Festigkeiten von etwa 1.000 N/mm<sup>2</sup> zur Anwendung, die einen zähen Kern besitzen und deren Oberflächen poliert und gehärtet werden. Die Werkzeugkosten fallen dementsprechend hoch aus (Mennig, 2008, S. 71).

Die Werkzeuge sind mehrteilig aufgebaut und bestehen aus Patrize und Matrize. Die Formen müssen beheizt werden, damit die Duroplaste in der Kavität aushärten können. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten (Mennig, 2008, S. 55):

- direkte Beheizung durch integrierte elektrische Heizelemente oder Temperierkanäle nahe der Kavität
- indirekte Beheizung durch Heizplatten von außen

### 5.3.3 Fazit

Auch das Pressverfahren ist aus technischer Sicht geeignet für die Herstellung von Sandkästen. Es weist Vorzüge auf bei der großflächigen, dünnwandigen Form der Sandkästen. Aus wirtschaftlicher Sicht ist es jedoch ähnlich einzuschätzen wie das Spritzgussverfahren. Für die geringen Stückzahlen, die in den einzelnen Projekten erreicht werden, sind die Anlaufkosten auf Grund der aufwändigen Werkzeuge zu hoch. Außerdem sind vor allem beim SMC- und GMT-Verfahren die Werkstoffkosten hoch.

## 5.4 Extrusionsblasformen

Durch die verschiedenen Blasformverfahren können die unterschiedlichsten Hohlkörper mit einem Volumen von bis zu 10.000 l hergestellt werden. Die Anwendungsbereiche reichen von Getränkeflaschen, Benzinkanistern, Kraftstofftanks im Automobilbau bis zu Fässern, Heizölbatterietanks und anderen Großbehältern (Mennig, 2008, S. 113f).

Beim Blasformen werden thermoplastische Kunststoffe zu Hohlkörpern verarbeitet, indem ein Vorformling in einem Blaswerkzeug aufgeblasen wird. Dabei unterscheidet man nach der Art der Herstellung des Vorformlings (Mennig, 2008, S. 113):

- Extrusionsblasformen
- Spritzblasformen

Beim Spritzblasformen werden die Vorformlinge im Spritzgießverfahren hergestellt. Es eignet sich vorwiegend für die Herstellung einfacher, häufig rotationssymmetrischer Hohlkörper bis zu einem Volumen von maximal 10 l, z.B. Getränkeflaschen (Mennig, 2008, S. 114). Es ist also für die Herstellung von Sandkästen nicht geeignet.

Beim Extrusionsblasformen besteht der Vorformling aus einem extrudierten thermoplastischen Schlauch. Es können Behälter mit komplizierteren geometrischen Formen mit einem Volumen von bis zu 10.000 l hergestellt werden (Mennig, 2008, S. 114). Außerdem besteht die Möglichkeit, z.B. spritzgegossene Teile in das Produkt zu integrieren (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 74). Sandbehälter mit einem üblichen geforderten Inhalt von rund 20 bis 80 l erscheinen zunächst als sehr geeignet für dieses Verfahren, weshalb in weiterer Folge ausschließlich das Extrusionsblasformen beschrieben wird.

### 5.4.1 Fertigungsprozess

Beim Extrusionsblasformen werden am häufigsten die Kunststoffe PE (50 %) und PET<sup>1</sup> (40 %) verarbeitet. PE eignet sich für eine Vielzahl von Anwendungen und kommt auch für die Fertigung von Sandkästen in Frage. PET wird hauptsächlich zur Herstellung von Getränkeverpackungen verwendet (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 69).

Eine Extrusionsblasformmaschine ist schematisch in Abbildung 34 dargestellt. Beim Blasformen handelt es sich um einen zweistufigen Prozess und daher werden auch zwei Werkzeuge benötigt (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 69):

1. Der Extruder (1) plastifiziert die Formmasse und fördert die Schmelze in das Schlauchwerkzeug (2). Dieses stößt einen an das Produkt angepassten Schlauch (Vorformling)(3) aus.
2. Der thermoplastische Schlauchabschnitt (3) wird im Blaswerkzeug (4) aufgeblasen, bis der Schlauch die Kontur der Kavität angenommen hat. Nach der Kühlzeit wird das Formteil entformt.

---

<sup>1</sup> PE: Polyethylen, PET: Polyethylenterephthalat

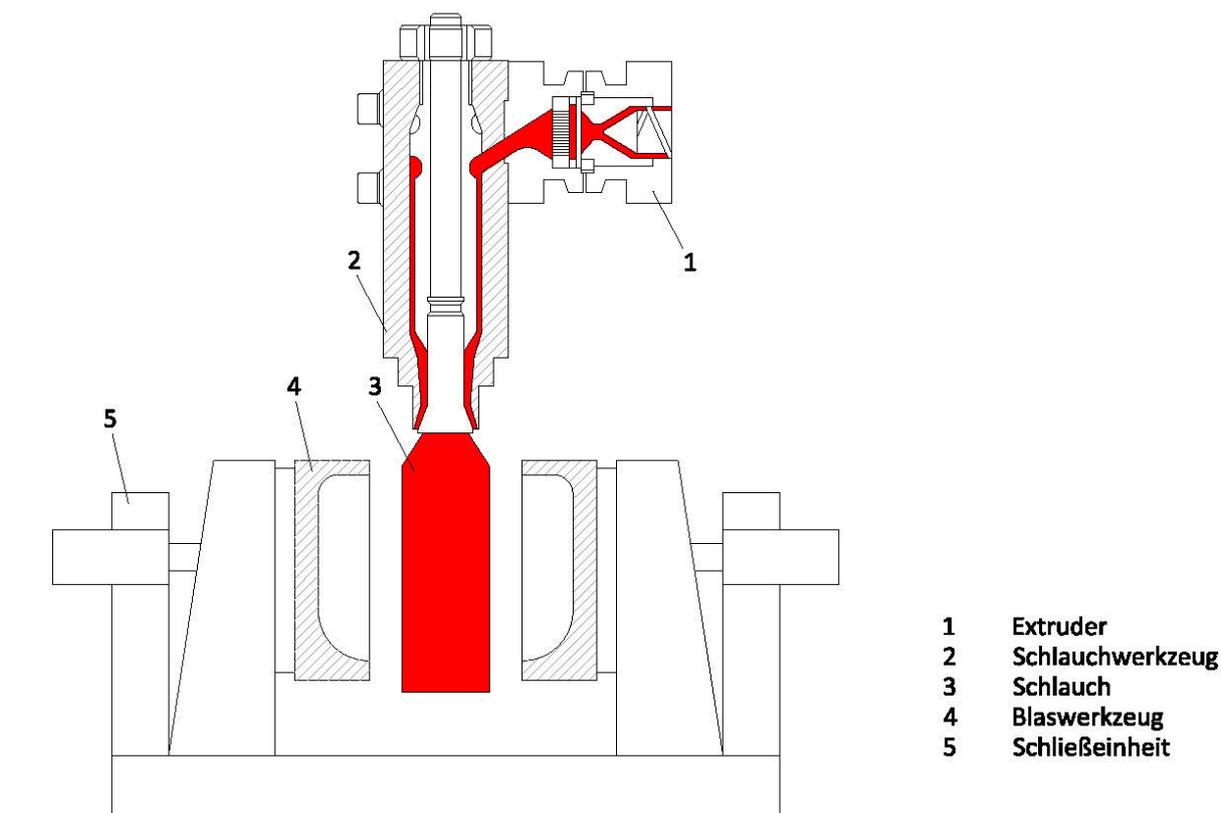


Abbildung 34: Schema des Extrusionsblasformens

Quelle: (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 76)

Zur Anpassung des Vorformlings an das Endprodukt verfügen die Schlauchwerkzeuge über eine aufwändige Wanddickensteuerung. So kann die Wanddicke des Schlauchs an bestimmten Stellen variiert werden, um eine gleichmäßige Wanddicke des Formteils trotz unterschiedlicher Aufblasweiten zu gewährleisten (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 69f). Bei der Herstellung von größeren Hohlkörpern wie Sandkästen kommen Speicherkopfwerkzeuge zum Einsatz. Diese besitzen einen ringförmigen Schmelzespeicher und der Vorformling wird durch einen Kolben intermittierend ausgeschoben (Mennig, 2008, S. 115).

Das Aufblasen des Vorformlings geschieht entweder durch einen Kalibrierdorn, wenn eine genau definierte Öffnung im Hohlkörper gewünscht ist, oder durch eine Hohnadel. In diesem Fall kann das Einstichloch nachträglich verschweißt werden. Der Blasdruck beträgt 6-8 bar (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 72f).

## 5.4.2 Werkzeuge

Die Anforderungen an das Blaswerkzeug - und in weiterer Folge die Kosten - sind auf Grund der niedrigeren Verarbeitungsdrücke wesentlich geringer als beim Spritzgieß- und Pressverfahren. Für die Hohlformen kommen verschiedene Formwerkstoffe in Frage. Bei der Auswahl werden die Anforderungen an das Produkt, die Formteilgeometrie und -größe und die Stück-

zahl berücksichtigt. Mögliche Formwerkstoffe sind z.B. Stahl, Blockaluminium, Zinkguss, Aluminiumguss oder Kupferlegierungen (Mennig, 2008, S. 124).

Für gegossene Formen wird ein Positivmodell mit Schrumpf benötigt. Zur Werkzeugkühlung muss außerdem ein Rohrkäfig aus Kupfer oder Stahl angefertigt werden, der in die Form mit eingegossen wird. In letzter Zeit haben sich daher gefräste Formen aus Blockaluminium durchgesetzt. Diese werden direkt nach den CAD-Daten gefertigt und können in kurzer Zeit hergestellt werden. Die Kühlkanäle werden in einfacher Weise gebohrt oder gefräst. Änderungen am Produkt und Werkzeug sind schnell und einfach durchzuführen und diese Werkzeuge liefern maßhaltige Formteile (Mennig, 2008, S. 122).

### **5.4.3 Fazit**

Der Produktionsprozess sowie die verwendeten Werkzeuge sind für die Herstellung von Sandkästen gut geeignet. Ein Vorteil dieses Verfahrens liegt auch darin, dass der Sandkasten als ein geschlossenes Bauteil erzeugt wird, während es bei den zuvor vorgestellten Verfahren nötig ist, zumindest zwei Bauteilhälften zu verbinden. Dies stellt sowohl einen Kostenfaktor wie auch eine konstruktive Schwachstelle dar, die es im Vergleich separat zu berücksichtigen gilt.

Im direkten Vergleich mit dem Spritzgieß- und Pressverfahren sind die Investitionskosten in die Werkzeugerstellung wesentlich geringer. Andererseits sind die Maschinenkosten auf Grund des aufwändigen, zweistufigen Verfahrens relativ hoch. Daher wird das Blasformen auch erst bei höheren Stückzahlen wirtschaftlich, die bei der Produktion von Sandkästen nicht erreicht werden.

## **5.5 Rotationsformen**

In diesem Verfahren können große, nahtlose Hohlkörper in kleinen Serien wirtschaftlich hergestellt werden. Es eignet sich für technische Produkte mit komplizierter Geometrie und einem Volumen bis 15.000 l und Abmessungen bis 3.000 mm. Die Produktpalette umfasst z.B. Transport- und Lagerbehälter, Tanks, Wannen, Streusandbehälter, Bootskörper, Karosserieteile, Möbel etc. Auch die neuen Enzos im Museumsquartier in Wien werden seit 2010 im Rotationsverfahren hergestellt. Das Verfahren kommt vor allem dort zum Einsatz, wo die Grenzen des Blasformens überschritten werden (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 181).

Die Werkzeugkosten sind im Vergleich zu den bisher vorgestellten Verfahren gering. Somit eignet sich das Rotationsformen besonders für kleinere Serien wie bei den beiden in dieser Arbeit behandelten Projekten. Außerdem können Formteile mit großer Wanddicke (>10 mm)

nahezu spannungsfrei und mit gleichmäßiger Wandstärke gefertigt werden (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 181).

### 5.5.1 Fertigungsprozess

Beim Rotationsformen können nahezu alle Thermoplaste verarbeitet werden. Günstig sind Formmassen, die wenig temperaturempfindlich sind so wie z.B. PE. Dieser Werkstoff ist zudem vielseitig einsetzbar und wird beim Rotationsformen am häufigsten angewendet (Mennig, 2008, S. 160). PE wäre auch für die Fertigung von Sandkästen geeignet. Vor der Verarbeitung wird das Kunststoffgranulat gemahlen, da eine pulverförmige Formmasse ein günstigeres Aufschmelzverhalten aufweist. Zusätzlich können Verstärkungsstoffe wie z.B. Glasfasern beigemischt werden. Außerdem ist es möglich, verschiedene Kunststoffe in einem Arbeitsgang zu verarbeiten. So entstehen Formteile mit einem schichtartigen Aufbau oder einer Sandwichstruktur mit geschäumter Mittelschicht (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 181f). Das Rotationsformen gibt dem Konstrukteur also große Freiheiten in der Gestaltung des Wandaufbaus.

Abbildung 35 zeigt das Prinzip des Rotationsformens. Zunächst wird die dosierte Formmasse in das kalte Werkzeug gefüllt und das Werkzeug geschlossen (a). Dann wird das Werkzeug in eine biaxiale Drehbewegung versetzt und gleichzeitig aufgeheizt. So verteilt sich die Formmasse gleichmäßig in der Kavität und schmilzt an der Werkzeuginnenwand auf (b). Sobald das Material vollständig geschmolzen und gleichmäßig verteilt ist, wird das Werkzeug unter Beibehaltung der Rotationsbewegung gekühlt (c). Wenn die Formmasse soweit abgekühlt ist, dass sie formstabil ist, wird das Werkzeug geöffnet und der fertige Bauteil entformt (Eyerer, Hirth, & Elsner, 2008, S. 322).

Die Beheizung und Abkühlung des Werkzeugs kann auf unterschiedliche Weise erfolgen:

- in eigenen Stationen: Das Werkzeug wird in einer Heizkammer von außen beheizt und anschließend in einer Kühlkammer durch Luft oder Sprühnebel gekühlt.
- durch Temperiermedium: Das Werkzeug, das doppelwandig aufgebaut ist oder Heiz- und Kühlkanäle besitzt, wird mittels Öl geheizt und gekühlt.

Durch die Rotation sammelt sich die Kunststoffschmelze vermehrt in Radien und Außenkonturen, was in diesen Bereichen zu Verdickungen der Wandstärke und somit zu erhöhter Steifigkeit der Bauteile führt. Eine weitere Möglichkeit, die Stabilität zu erhöhen, besteht darin, in der Konstruktion Berührungspunkte der einzelnen Wände zu verwirklichen (Mennig, 2008, S. 160f). In dem Konzeptentwurf für das Schnellbahnprojekt wird dieses Prinzip angewendet, siehe Kapitel 6.2.1.

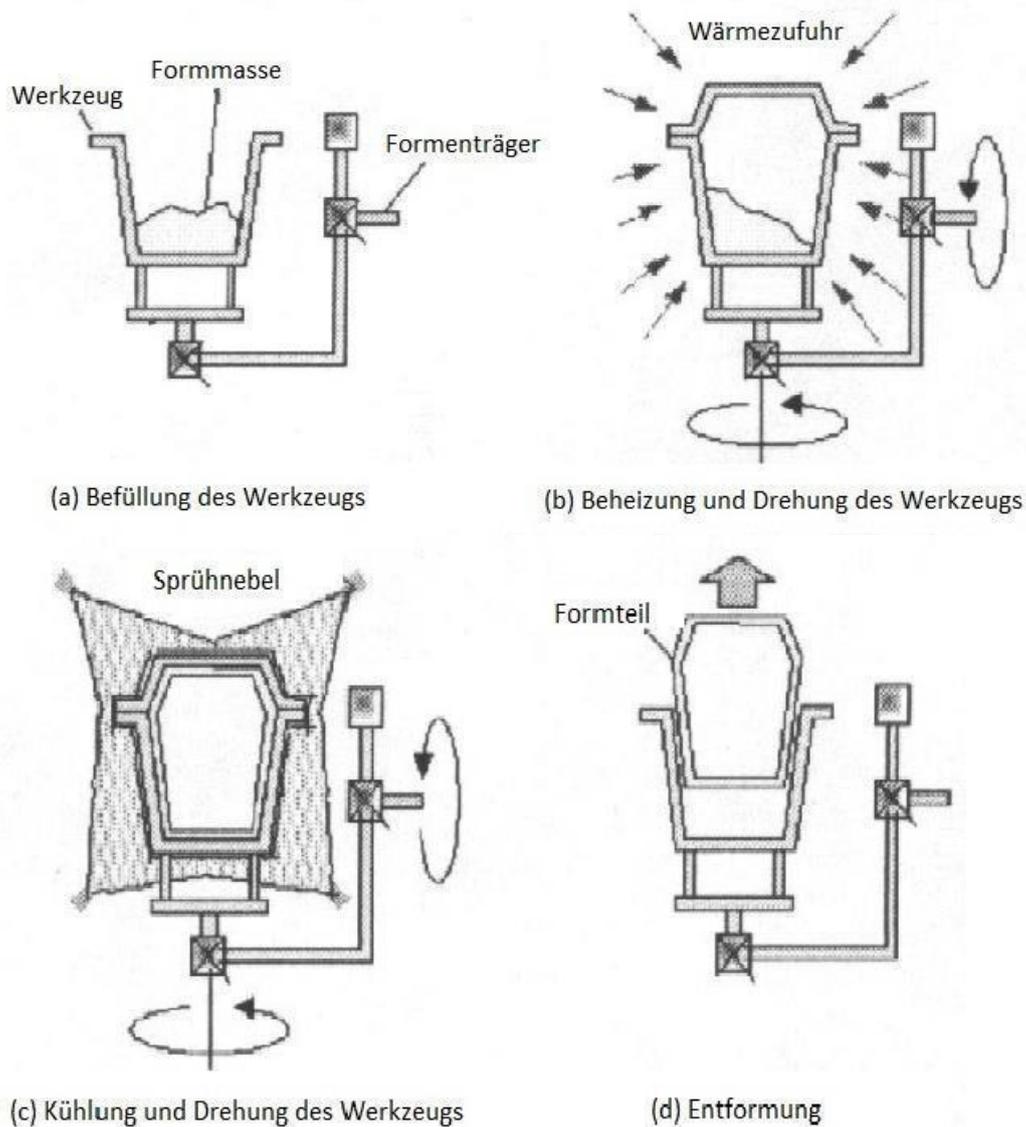


Abbildung 35: Schema des Rotationsformens

Quelle: Prospekt Fa. Grütter

Ein weiterer Vorteil des Rotationsformens ist, dass Bauteile aus anderen Materialien direkt in das Produkt integriert werden können. So können z.B. Befestigungspunkte mit einem Metallgewinde versehen werden oder Befestigungsglaschen aus Metall eingebaut werden. Diese sogenannten Einlegeteile werden im Werkzeug fixiert und von der Kunststoffschmelze umflossen. So entsteht eine dauerhafte und formstabile Verbindung mit dem Formteil (Mennig, 2008, S. 174).

Die Nachteile des Verfahrens sind aus technischer Sicht die großen Fertigungstoleranzen von  $\pm 1\%$  in den Längen sowie die relativ unebenen größeren Flächen. Aus wirtschaftlicher Sicht wirken sich die langen Zykluszeiten (10-60 min, abhängig von Werkzeug, Größe und Wanddicke des Formteils, Werkstoff) und der hohe Energiebedarf nachteilig aus. Dadurch kommt das Verfahren nur für kleinere Serien in Frage (Eyerer, Hirth, & Elsner, 2008, S. 323).

### 5.5.2 Werkzeuge

Das Rotationsformen unterscheidet sich bei den Ansprüchen an die Werkzeuge wesentlich von den bisher vorgestellten Verfahren. Da es sich auf Grund der nur langsamen Drehbewegung um ein druckloses Verarbeitungsverfahren handelt, ist die mechanische Beanspruchung gering. Auf der anderen Seite werden die Werkzeuge bei jedem Produktionszyklus auf ca. 300 °C erhitzt und danach wieder auf Raumtemperatur abgekühlt. Diese thermische Wechselbeanspruchung wird bei der Konstruktion des Werkzeugs und der Werkstoffwahl berücksichtigt, indem das Werkzeug möglichst dünnwandig und gut wärmeleitend gestaltet wird. Eine gleichmäßige Wärmezufuhr über die gesamte Oberfläche ist ausschlaggebend für gute Formteileigenschaften (Mennig, 2008, S. 161).

Die Werkzeuge werden aus Aluminium (gefräst, Aluminiumguss oder Aluminiumblech) oder Stahlblech gefertigt. Die Auswahl des geeigneten Werkstoffs und Herstellungsverfahrens erfolgt je nach Größe und Geometrie des Formteils, der geforderten Genauigkeit und der erwarteten Stückzahlen und Kosten (Mennig, 2008, S. 163). Durch die Einfachheit der Werkzeuge gibt es vielfältige Möglichkeiten bei der Gestaltung der Formen. So ist z.B. auch eine Kombination verschiedener Formwerkstoffe möglich. Eine weitere interessante Option ist die Verwendung von Kombinationswerkzeugen. Durch Wechseleinsätze können verschiedene Varianten eines Produkts mit einem Werkzeug hergestellt werden (Mennig, 2008, S. 162). Außerdem sind Änderungen bei Rotationswerkzeugen vergleichsweise einfach und kostengünstig zu bewerkstelligen, indem auf das bestehende Werkzeug aufgeschweißt wird, die vorhandene Wandstärke bearbeitet wird oder ein neuer Werkzeugteil eingesetzt wird (Mennig, 2008, S. 172).

Die Werkzeughälften werden beim Rotationsformen nicht durch eine Schließeinheit zusammen gehalten, sondern gegeneinander verspannt oder verschraubt. Dabei ist auf eine wirksame Abdichtung zu achten (Mennig, 2008, S. 170). Die Oberflächenbeschaffenheit des Werkzeugs ist ausschlaggebend für die Oberfläche des Produkts und beeinflusst die Herstellungskosten erheblich. Bei Sandkästen werden keine besonderen Anforderungen an die Oberfläche gestellt (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 184). Außerdem verfügt das Werkzeug über eine Entlüftung in Form eines PTFE-Rohres, um einen Druckausgleich beim Beheizen und Abkühlen zu ermöglichen (Mennig, 2008, S. 173). Das gesamte Werkzeug wird auf einem Formenträger montiert, der die Drehbewegung um zwei Achsen ermöglicht.

### 5.5.3 Fazit

Von den bisher untersuchten Verarbeitungsverfahren erscheint dieses Verfahren am geeignetsten zur Herstellung von Sandkästen. Die Werkzeuge sind relativ einfach und kostengünstig herzustellen und das Verfahren ist besonders für Kleinserien geeignet. Auch die Produkt-

palette zeigt, dass Rotationsformteile in ähnlichen Anwendungsbereichen zum Einsatz kommen.

Die großen Vorteile sind die Vielseitigkeit und die technischen Möglichkeiten des Verfahrens. Die Nachteile der großen Toleranzen und unebenen größeren Flächen müssen bei der Konstruktion bedacht werden und dafür konstruktive Lösungen erarbeitet werden, z.B. bei der Anbringung der Sandungsanlage am Bodenflansch oder bei den Befestigungspunkten am Fahrzeug. Die Rieselfähigkeit des Sandes sollte durch die Unebenheiten nicht beeinflusst werden.

## 5.6 Faserverstärkte Kunststoffe

Als faserverstärkte Kunststoffe (FVK) bezeichnet man Verbundwerkstoffe, die aus Verstärkungsfasern bestehen, welche in einer Kunststoffmatrix eingebettet sind. Andere übliche Bezeichnungen sind Faserverbundwerkstoff (FVW) und Faser-Kunststoff-Verbund (FKV). Diese Werkstoffe zeichnen sich durch ihre hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeit sowie gutes Ermüdungs- und Korrosionsverhalten aus. Die Anwendungsbereiche umfassen z.B. den Flugzeug-, Boots- und Automobilbau, aber auch die Fertigung von Behältern. Grundsätzlich sind die faserverstärkten Kunststoffe für große, flächige Teile geeignet (Michaeli, 2010, S. 149f).

Prinzipiell kann jeder Kunststoff durch faserförmige Materialien verstärkt werden. In Kapitel 5.3 wurde die Verarbeitung der sogenannten Prepregs (SMC, GMT) im Pressverfahren beschrieben. Außerdem können Verstärkungen aus Kurzfasern in den bereits vorgestellten Verfahren wie z.B. Spritzgießen oder Rotationsformen eingearbeitet werden. In diesem Kapitel werden spezielle Verarbeitungsverfahren für Verbundwerkstoffe mit duroplastischer Matrix und Verstärkungen aus Endlos- oder Langfasern dargestellt. Die Möglichkeiten und Verfahrensvarianten sind sehr vielfältig, weshalb hier nur eine beschränkte Auswahl an Verfahren gezeigt werden kann, welche zur Herstellung von Sandkästen geeignet erscheinen.

Bauteile aus Verbundwerkstoffen gelten im Allgemeinen als hochwertig und teuer, man denke z.B. an Fahrradrahmen aus CFK (Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff) im Vergleich zu Aluminium oder Stahl. Im vorliegenden Projekt wird jedoch weder auf Leichtbau noch auf außerordentliche Festigkeit besonderer Wert gelegt. Das Ziel der Arbeit ist vielmehr, Sandkästen möglichst kostengünstig herzustellen. Die Frage ist also, ob es ein Produktionsverfahren gibt, das gegenüber der Herstellung aus Stahl- oder Aluminiumblechen solche Vorteile bietet, dass die Sandkästen trotz der hohen Materialkosten günstiger gefertigt werden können. Es werden also insbesondere Verfahren für kleine bis mittlere Serien und flächige Bauteile untersucht.

### 5.6.1 Materialien für FVK

Die duroplastischen Formmassen bestehen aus dem Reaktionsharz, einem Härter und verschiedenen Zusatz- und Füllstoffen, welche auf die gewünschte Beschaffenheit des Endproduktes abgestimmt werden müssen. Die Verwendung dieser Füll- und Verstärkungsstoffe erfolgt deswegen, weil die verwendeten Harze in ihrer ursprünglichen Form oftmals zu spröde sind, eine zu große Schwindung aufweisen, eine zu geringe Festigkeit, Steifigkeit oder Härte besitzen oder einfach zu teuer sind (Eyerer, Hirth, & Elsner, 2008, S. 361ff).

Die nachfolgende Tabelle 4 zeigt eine Auflistung von häufig verwendeten Stoffen für die faserverstärkten Kunststoffe, woraus sich eine Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten ergibt:

Reaktionsharze	Füllstoffe	Verstärkungsstoffe
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Phenolharz (PF)</li> <li>• Ungesättigtes Polyesterharz (UP)</li> <li>• Epoxidharz (EP)</li> <li>• Harnstoffharz (UF)</li> <li>• Melaminharz (MF)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quarzmehl</li> <li>• Holzmehl</li> <li>• Gesteinsmehl</li> <li>• Kreide</li> <li>• Talkum</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Glasfasern</li> <li>• Aramidfasern</li> <li>• Kohlenstofffasern</li> <li>• Ruß</li> <li>• Naturfasern</li> </ul>

*Tabelle 4: Beispiele für Reaktionsharze, Füll- und Verstärkungsstoffe*

*Quelle: (Eyerer, Hirth, & Elsner, 2008, S. 361ff)*

Die Vernetzung der härtbaren Formmasse kann auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen:

- Warmhärtung bei Temperaturen oberhalb 70 °C
- Kalthärtung bei Temperaturen bis ca. 30 °C

Bei der Kalthärtung wird zusätzlich zum Härter noch ein Beschleuniger benötigt, um die Vernetzung in Gang zu setzen. Härter und Beschleuniger werden auch als Reaktionsmittel bezeichnet. Bei der Kalthärtung ist nach dem Entformen ein Nachhärten (Tempern) zweckmäßig, um die Festigkeitseigenschaften des Bauteils zu verbessern. Der Vorteil der Warmhärtung ist eine kürzere Härte- und Zykluszeit. Die auftretenden Verarbeitungstemperaturen müssen natürlich bei der Konstruktion des Werkzeugs und bei der Wahl des Werkzeugwerkstoffs berücksichtigt werden. Umgekehrt kommen für manche Verfahren nur entweder Kalt- oder Warmhärtung in Frage (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 167f).

Als Faserverstärkung werden für unseren Anwendungsfall nur Glasfasern in Betracht gezogen. Aramid- und Kohlenstofffasern bieten zwar eine höhere Festigkeit, sind aber auch erheblich teurer. Meistens werden flächige Halbzeuge verarbeitet in Form von uni- oder bidirektionalen Geweben oder Glasfasermatten mit quasiisotropischen Eigenschaften (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 165). Die Faserverstärkungen müssen während der Verarbeitung verdichtet werden. Je nach gefordertem Fasergehalt und -struktur treten daher unterschiedliche Anforderungen an das Werkzeug und den Prozess auf. Umgekehrt bestimmt ein gewähltes Verarbeitungsverfahren die mögliche Faserstruktur (Michaeli, 2010, S. 153).

Im Folgenden werden drei Verfahren vorgestellt, die für kleine bis mittlere Serien geeignet und für die Herstellung von Sandkästen denkbar sind, nämlich: Handlaminieren, Faserharzspritzen, Injektionsverfahren (RTM<sup>1</sup>).

## 5.6.2 Handlaminieren

Beim Handlaminieren wird das Ausgangsmaterial von Hand auf das Werkzeug aufgebracht. Dabei wird so vorgegangen, dass zuerst eine Lage Harz und danach eine Lage Faserverstärkung aufgetragen wird. Dies erfolgt so lange abwechselnd, bis die gewünschte Materialstärke erreicht ist. Die Fasermatten oder -gewebe werden mit Pinseln, Walzen oder Rollen in die Harzschicht eingearbeitet, sodass die Fasern gut getränkt und verdichtet und Lufteinschlüsse vermieden werden. Die Abbildung 36 zeigt den Arbeitsprozess. Das Handlaminieren erfordert großes handwerkliches Geschick und ist sehr lohnintensiv, dafür sind nur geringe Investitionskosten notwendig. Es eignet sich für kleine Serien und großflächige und komplizierte Teile. Es ist aber nicht möglich, eine vorgegebene Faserstruktur exakt einzuhalten und der maximal mögliche Fasergehalt ist mit weniger als 45 % relativ gering (Michaeli, 2010, S. 153).

Das Handlaminieren ist ein Nass-in-Nass-Prozess und ist für Materialdicken von rund 2-10 mm geeignet. Nachdem ein Trennmittel auf das Werkzeug aufgetragen wurde, wird eine harzreiche Oberflächenschicht (Feinschicht) zum Schutz gegen Umwelteinflüsse aufgebracht. Danach werden die einzelnen Schichten laminiert und verdichtet und zum Abschluss wieder eine Deckschicht aufgetragen. Wenn der Bauteil ausreichend gehärtet ist, wird er entformt und bei ca. 50-60 °C nachgehärtet. Die Taktzeit kann 30 Minuten bis mehrere Tage betragen (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 168).

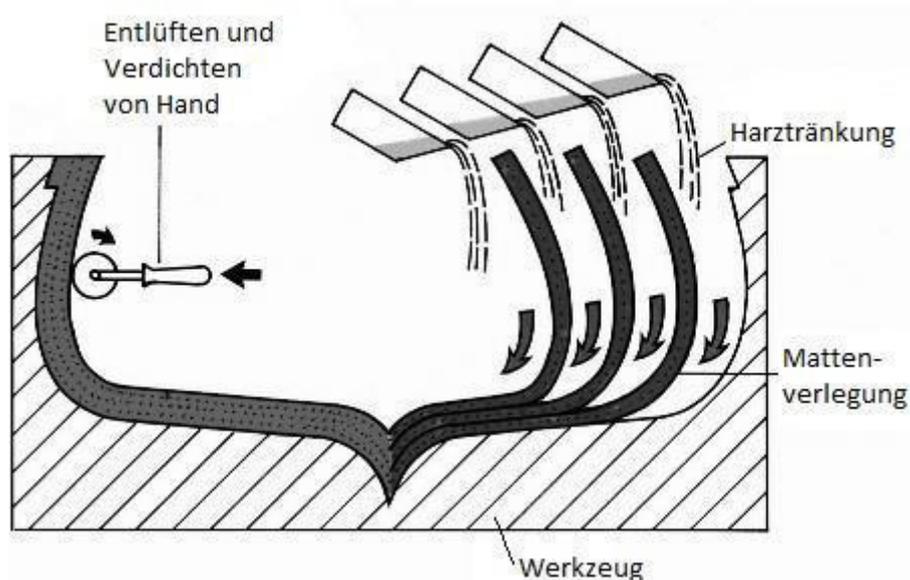


Abbildung 36: Schema des Handlaminierens  
Quelle: (Eyerer, Hirth, & Elsner, 2008, S. 367)

<sup>1</sup> RTM: Resin Transfer Moulding

Das Werkzeug ist offen und einteilig und es werden keine besonderen Anforderungen daran gestellt. Das Verfahren wird nahezu drucklos (Handdruck) und bei Raumtemperatur ausgeführt. Die Werkzeuge müssen daher weder druck- noch hitzestabil sein. Besondere Eigenschaften bezüglich Wärmeleitfähigkeit wie bei anderen kunststoffverarbeitenden Verfahren sind nicht nötig. Die Werkzeuge können selbst aus glasfaserverstärkten Reaktionsharzen oder aus Holz, Gips oder anderen Modellmassen hergestellt werden (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 169).

### **5.6.3 Faserharzspritzen**

Das Faserharzspritzen kann auch als teilmechanisiertes Handlaminieren bezeichnet werden. Dabei wird das Harz mit den Verstärkungsfasern und dem Härter und Beschleuniger durch das Faserharzspritzgerät (eine Art Spritzpistole) gemischt und auf das Werkzeug aufgetragen. Die Endlos-Glasfaser wird im Spritzkopf auf eine Länge von ca. 20 bis 50 mm geschnitten und auf die Form aufgeblasen. Gleichzeitig werden Harz, Härter und Beschleuniger aus zwei Düsen auf das Werkzeug gespritzt. Die aufgebrachten Werkstoffkomponenten werden dann wie beim Handlaminieren mit Walzen oder Rollen verdichtet. Die Abbildung 37 zeigt das Verarbeitungsprinzip. Die Materialaufbringung geht etwas schneller und einfacher als beim Handlaminieren, das Verfahren stellt aber noch höhere Ansprüche an das handwerkliche Können. Die Verstärkungsfasern sind im Laminat zufällig verteilt und es entsteht ein quasiisotropes Bauteil. Das Faserharzspritzen eignet sich für kleine Serien und großflächige Teile wie Behälter und Auskleidungen (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 170f).

Die Vorteile gegenüber dem Handlaminieren sind (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 171):

- Das Zuschneiden und Einlegen der Verstärkungselemente entfällt.
- Großflächige Bauteile sind einfacher auszuführen.
- Das Arbeiten an senkrechten Wänden und über Kopf ist einfacher möglich.

Für die Werkzeuge und die Prozessparameter gilt das gleiche wie beim Handlaminieren. Die Verarbeitung erfolgt durch Handdruck und bei Raumtemperatur. Die Werkzeuge sind ebenso offen und einteilig und können aus Kunststoff, Holz oder Metall gefertigt werden (Schwarz, Ebeling, & Furth, 2005, S. 176).

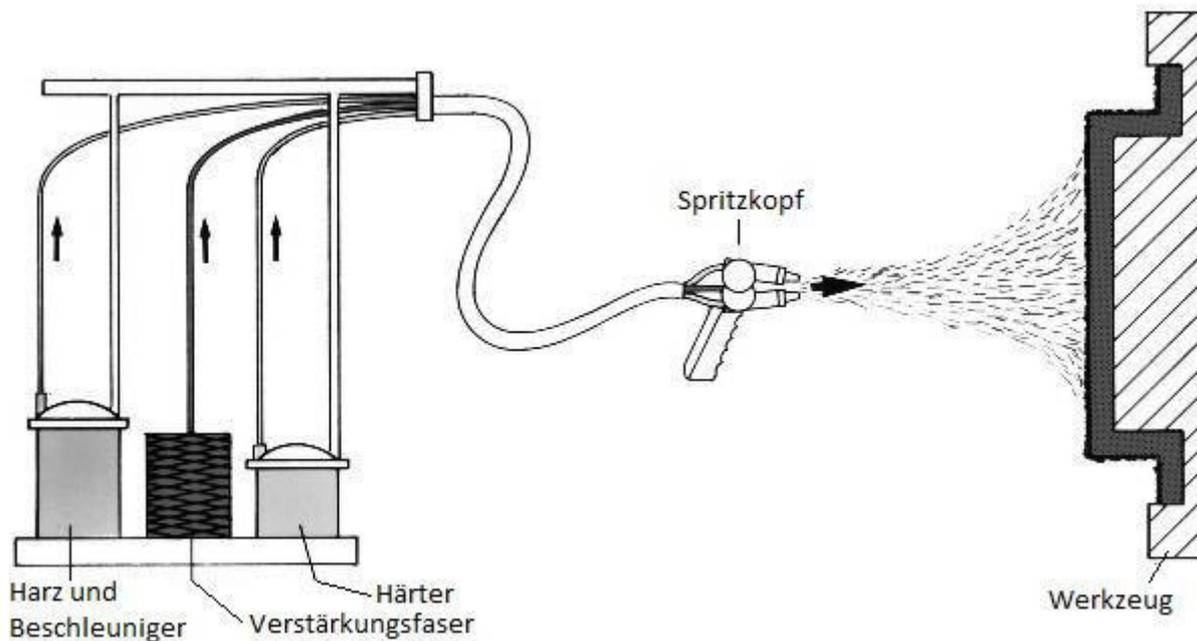


Abbildung 37: Schema des Faserharzspitzens

Quelle: (Eyerer, Hirth, & Elsner, 2008, S. 369)

#### 5.6.4 Injektionsverfahren (RTM<sup>1</sup>)

Das RTM-Verfahren ist im Vergleich zu den zwei gerade vorgestellten Verfahren deutlich weiter automatisiert. Es arbeitet mit zwei festen Werkzeughälften, in welche die Verstärkungselemente eingelegt werden und dann das Harz injiziert wird. Dieses Verfahren eignet sich für flächige Bauteile und kleine bis mittlere Serien. Die Investitionskosten und die Anforderungen an das Werkzeug sind höher als beim Handlaminieren, dafür sind die Lohnkosten niedriger und es sind höhere Stückzahlen möglich (Michaeli, 2010, S. 157).

Die Abbildung 38 zeigt den Ablauf des RTM-Verfahrens. Die trockene Faserverstärkung wird in das Werkzeug eingelegt, das Werkzeug wird geschlossen und dadurch die Faserstruktur verdichtet. Dann wird das flüssige Reaktionsharz über einen Anguss mit geringem Druck injiziert, zusätzlich kann an den Entlüftern (Steigern) Vakuum angelegt werden. Das Harz durchströmt die Faserverstärkung und tritt an den Steigern wieder aus. Dann werden die Entlüfter verschlossen und das Bauteil härtet (evtl. unter Nachdruck) aus. Nach der Härtezeit wird das Werkzeug geöffnet und der fertige Bauteil entformt (Michaeli, 2010, S. 157f).

<sup>1</sup> Resin Transfer Moulding

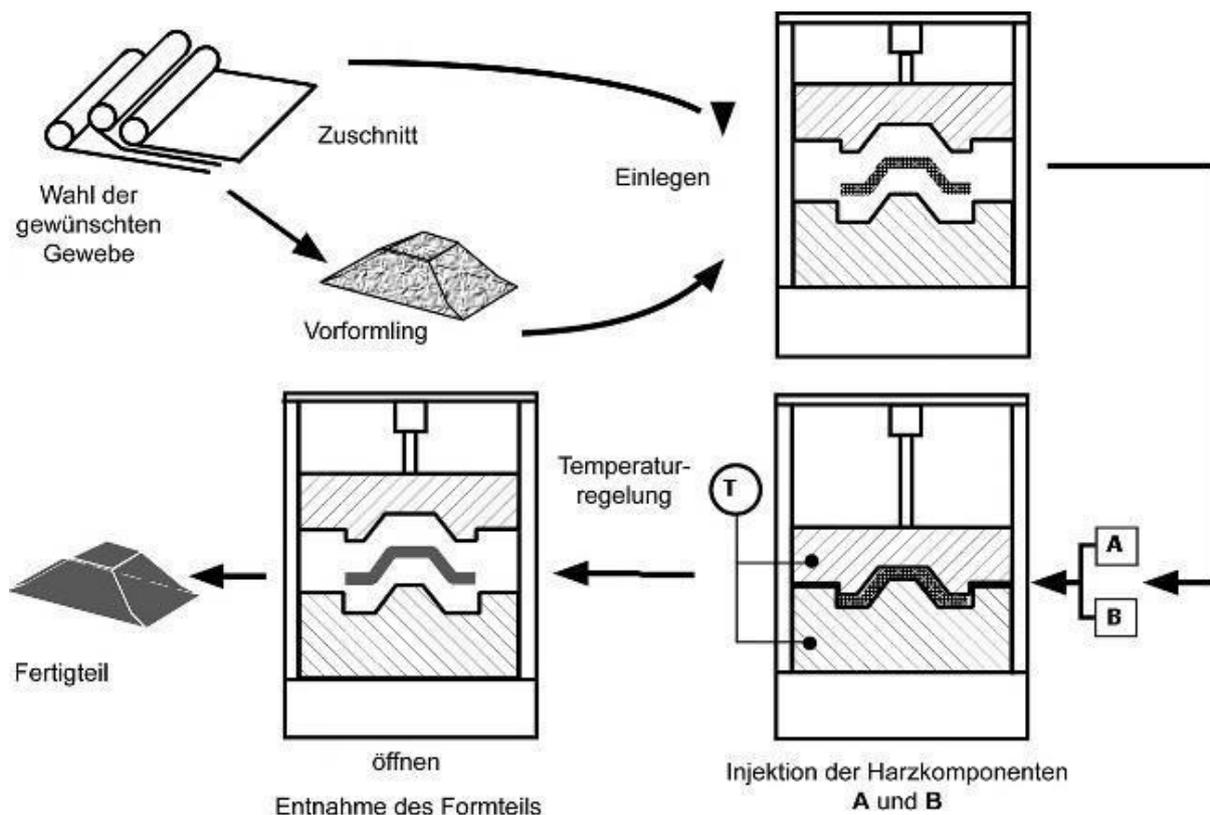


Abbildung 38: Schema des RTM-Verfahrens

Quelle: (Eyerer, Hirth, & Elsner, 2008, S. 371)

Die Faserverstärkungen (Gewebe, Gelege, Matten) können entweder einzeln zugeschnitten und nacheinander in das Werkzeug eingelegt werden, oder man verwendet sogenannte Vorformlinge (Preforms), siehe auch Abbildung 38. Der Vorformling ist eine trockene Faserstruktur, deren Form weitgehend der Bauteilgeometrie entspricht. Die Herstellung kann manuell oder automatisch erfolgen. So können einerseits die Beschickungs- und Zykluszeit verkürzt und der Automatisierungsgrad erhöht werden, andererseits stellt die Herstellung der Vorformlinge einen zusätzlichen Aufwand dar (Mennig, 2008, S. 224ff).

Die Werkzeuge unterliegen höheren Ansprüchen als beim Handlaminieren und müssen stabiler und aufwändiger gebaut werden. Die mechanische Belastung resultiert aus den Kräften zum Verdichten der Verstärkungsstruktur und aus dem Werkzeuginnendruck. Die erforderliche Kraft zum Kompaktieren der Fasern ist abhängig vom Faservolumengehalt und damit von den Anforderungen an das Bauteil (Mennig, 2008, S. 232f). Der Injektionsdruck liegt bei Drucktopfinjektion zwischen 0,5 bar und ca. 8 bar (Michaeli, 2010, S. 158). Außerdem ist je nach verwendetem Harz und Aushärtezyklus eine Beheizung oder Kühlung des Werkzeugs mittels Temperierkanälen notwendig (Mennig, 2008, S. 233).

Die Konstruktion eines RTM-Werkzeugs richtet sich danach, welcher Aufwand für die konkrete Anwendung gerechtfertigt bzw. notwendig ist. Die technischen Spezifikationen des Bauteils, der verwendete Werkstoff und die Stückzahlen bestimmen den Aufwand für die

Herstellung der Werkzeuge. Für größere Serien mit hohen Qualitätsanforderungen, hohem Faservolumengehalt und guter Reproduzierbarkeit kommen hochfeste Stähle zum Einsatz, deren Oberfläche gehärtet und poliert wird (Mennig, 2008, S. 234f). Für die in dieser Arbeit behandelten Projekte, die keinen besonders hohen Faservolumengehalt und keine allzu hochwertige Oberflächenbeschaffenheit erfordern und relativ geringe Stückzahlen haben, können auch weniger aufwändige Werkzeuge verwendet werden, z.B. aus Kunststoff oder Aluminium.

### **5.6.5 Fazit**

Bauteile aus faserverstärkten Kunststoffen erfüllen sehr hohe Ansprüche, zudem sind die Verarbeitungsmöglichkeiten äußerst vielseitig. Aus technischer Sicht ist die Herstellung von Sandkästen aus Faserverbundwerkstoffen also auf jeden Fall möglich. Je nach Geometrie, Anforderungen an das Produkt und erwarteter Stückzahl kommen verschiedene Verarbeitungsverfahren in Frage. Handlaminieren und Faserharzspritzen sind vor allem für Einzelteile und Kleinserien geeignet, das RTM-Verfahren auch für mittlere Serien. Technisch erscheint die Fertigung in allen drei Verfahren sinnvoll. Deshalb wird in weiterer Folge eine Anfrage an einen Hersteller von GFK-Bauteilen gestellt, um die Wirtschaftlichkeit der Verfahren darzulegen, siehe Kapitel 6.3.

## **5.7 Zusammenfassung und Vorauswahl**

In diesem Abschnitt werden noch einmal die wichtigsten Merkmale und Anwendungsbereiche der verschiedenen Fertigungsverfahren gegenüber gestellt. Die Tabelle 5 enthält als Fazit außerdem eine Beurteilung der Verfahren im Hinblick auf die Eignung zur Herstellung von Sandkästen. Es sei nochmal darauf hingewiesen, dass diese Bewertung nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten erfolgt und nicht auf Grund technischer Aspekte. Aus technischer Sicht wurde vorerst kein Verfahren ausgeschlossen. Die technische Machbarkeit und Eignung kann aber erst bei der Verwirklichung eines Projektes richtig beurteilt werden.

Verfahren	Werkzeugkosten	Stückzahlen	Merkmale	Produkte	Fazit
Metallschweißen	kein Werkzeug erforderlich	Prototypen Kleinserien	Flexible, aber arbeitsaufwändige Fertigung und Konstruktion		
Spritzgießen	hoch	Großserien, Massenfertigung	hohe Automatisierung und Reproduzierbarkeit, hohe Anlaufkosten	Mülltonnen, Bootskörper	
Pressen (incl. SMC, GMT)	hoch	Großserien	hohe Anlaufkosten	Großflächige, dünnwandige Bauteile	
Blasformen	mittel	mittlere-große Serien		verschiedenartige Hohlkörper, Kraftstofftanks, Fässer	
Rotationsformen	gering-mittel	kleine-mittlere Serien	vielseitig, flexibel	Hohlkörper mit komplizierter Geometrie, Behälter, Tanks, Wannen, Bootskörper	
Handlaminieren / Faserharzspritzen	gering	Kleinserien	Flexible, aber arbeitsaufwändige Fertigung, hohe Werkstoffkosten	großflächige Teile, Bootskörper	
Injektionsverfahren (RTM)	gering-hoch	kleine-mittlere Serien	hohe Werkstoffkosten	großflächige Teile, Transportbehälter, Motorhauben	

Tabelle 5: Übersicht über Fertigungsverfahren

Auf Grund dieser Überlegungen werden das Rotationsformverfahren und die Verfahren zur Verarbeitung von faserverstärkten Kunststoffen in die nähere Auswahl aufgenommen. In Kapitel 6 werden die verschiedenen Konzepte für die beiden Projekte aus Kapitel 4 vorgestellt und mit den herkömmlichen Schweißkonstruktionen verglichen, um die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Verfahren genauer darzulegen. Alle anderen Verfahren kommen wegen der geringen Stückzahlen bei der Produktion von Sandkästen nicht in Frage.

## 6 Vorstellung und Bewertung der Konzepte

In Kapitel 5.7 wurde eine Vorauswahl getroffen, welche Fertigungsverfahren weiter untersucht werden sollen. In diesem Kapitel werden nun jeweils drei Konzepte zu den beiden in Kapitel 4 beschriebenen Projekten vorgestellt. Die Fertigungsverfahren bei den verschiedenen Konzepten sind:

- herkömmliche Schweißkonstruktion
- Rotationsformen
- Handlaminieren (FVK)

Außerdem werden verschiedene Hersteller kontaktiert, um die Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit der einzelnen Konzepte abzuklären. Nach einer groben Kostenabschätzung kann schließlich eine Empfehlung für ein bestimmtes Fertigungsverfahren gegeben werden, mit dem Sandkästen in Zukunft hergestellt werden könnten.

### 6.1 Schweißkonstruktion aus Metall

Dieses Konzept entspricht der bis jetzt üblichen Konstruktion und Fertigung von Sandungssystemen. Der Lieferant der Sandkästen ist die Firma haasmetal Design, ein Spezialist für die Metallbe- und -verarbeitung. Die Tabelle 6 gibt eine Übersicht über das Unternehmen:

Kontakt:	Technik:	Leistungen:	Branchen:
haasmetal Design Vranovská 358/1 669 04 Znaim Tschechien www.haasmetal.eu	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CNC Metallbearbeitung</li> <li>• Laserschneiden</li> <li>• Umformen</li> <li>• Schweißen</li> <li>• Kleben</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwicklung</li> <li>• Berechnung</li> <li>• Konstruktion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bahntechnik</li> <li>• Maschinenbau</li> <li>• Fahrzeugindustrie</li> <li>• Lebensmittelindustrie</li> <li>• Bauindustrie</li> <li>• Solar- &amp; Energietechnik</li> </ul>

Tabelle 6: Übersicht haasmetal Design

Quelle: [www.haasmetal.eu](http://www.haasmetal.eu)

#### 6.1.1 Schnellbahnprojekt

In diesem Abschnitt wird eine herkömmliche Schweißkonstruktion für das in Kapitel 4.1 vorgestellte Schnellbahnprojekt entworfen. Dieses Projekt wurde am weitesten ausgearbeitet und die Firma haasmetal Design fertigte dafür zwei Prototypen an. Die Abbildung 39 zeigt ein Foto des Sandbehälters, welcher als „Sitzkiste“ ausgeführt wird.



Abbildung 39: Projekt Schnellbahn, Schweißkonstruktion, Foto eines Prototypen

Die Behälter werden aus nichtrostendem Stahl mit einer Blechstärke von 2 mm gefertigt. Für die Prototypen wurde ein Pauschalpreis von 500,- € pro Stück vereinbart, der auch die Entwicklungskosten für die Firma haasmetal Design inkludiert. Für die Serienproduktion wurden folgende Richtwerte zur Kalkulation bekannt gegeben:

Material plus 25 % Verschnitt			2,50	€/kg
Schweißen	5	Std	25	€/Std
Laserschneiden	20	min	75	€/Std
Biegen	20	sec/Biegung	35	€/Std
Einstellen	15	min/Teil		
Montage Blindnietmuttern	20	sec/Stück	20	€/Std
Verpackung	10	min	20	€/Std
Kleinmaterial			25	€

Tabelle 7: Angaben der Firma haasmetal Design zur Kostenabschätzung

Quelle: haasmetal Design, 2009

Folgende Berechnungen wurden durchgeführt, um die Kosten für den Sandbehälter abschätzen zu können:

Masse (laut Pro/E) + 25 % Verschnitt					28,25	kg
					35,31	kg
Biegen	23	Biegungen	20	sec/Biegung	7,67	min
	4	Teile	15	min/Teil	60,00	min
					67,67	min
Montage Blindnietmuttern	17	Stück	20	sec/Stück	5,67	min

Tabelle 8: Berechnungen zur Kostenabschätzung

Damit können jetzt die Kosten für den Sandbehälter in Serienproduktion abgeschätzt werden:

Material (inkl. 25% Verschnitt)	35,31	kg	2,50	€/kg	88,28	€
Schweißen	5	Std	25	€/Std	125,00	€
Laser	20	min	75	€/Std	25,00	€
Biegen	67,67	min	305	€/Std	39,47	€
Montage Blindnietmuttern	5,67	min	20	€/Std	1,89	€
Verpackung	10	min	20	€/Std	3,33	€
Kleinmaterial					25,00	€
<b>Gesamtkosten pro Stück</b>					<b>307,98</b>	<b>€</b>

*Tabelle 9: Kostenabschätzung Schweißkonstruktion*

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass es sich hier nur um eine Abschätzung handelt und nicht um ein konkretes Angebot der Firma haasmetal Design. Die Kosten wurden vonseiten des Zulieferers nicht exakt berechnet, da die Firma Knorr-Bremse den Zuschlag für dieses Projekt nicht erhielt und die Serienproduktion somit nicht realisiert wurde. Nach Erfahrungswerten erscheint aber ein Stückpreis von ca. 300 bis 350 € durchaus realistisch. Die Stundensätze, die der Berechnung zugrunde liegen, sind deshalb so niedrig, weil die Produktion in Tschechien liegt.

Wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben wird das Sandungssystem als eine geschlossene Kiste ausgeführt, auf welcher dann Sitze oder ein Gepäckregal montiert werden. Der eigentliche trichterförmige Sandbehälter sowie die Sandungsanlage und die weiteren Komponenten befinden sich innerhalb dieser Kiste. Die Schweißkonstruktion wird aus folgenden Einzelteilen aufgebaut (siehe auch Abbildung 40):

- Mantel
- Trichter (Sandkasten)
- Deckel
- Frontplatte
- Rahmen für Einfüllklappe
- Verstärkungsrippen
- Revisionsdeckel
- Platte zur Montage der Sandstandsanzeige

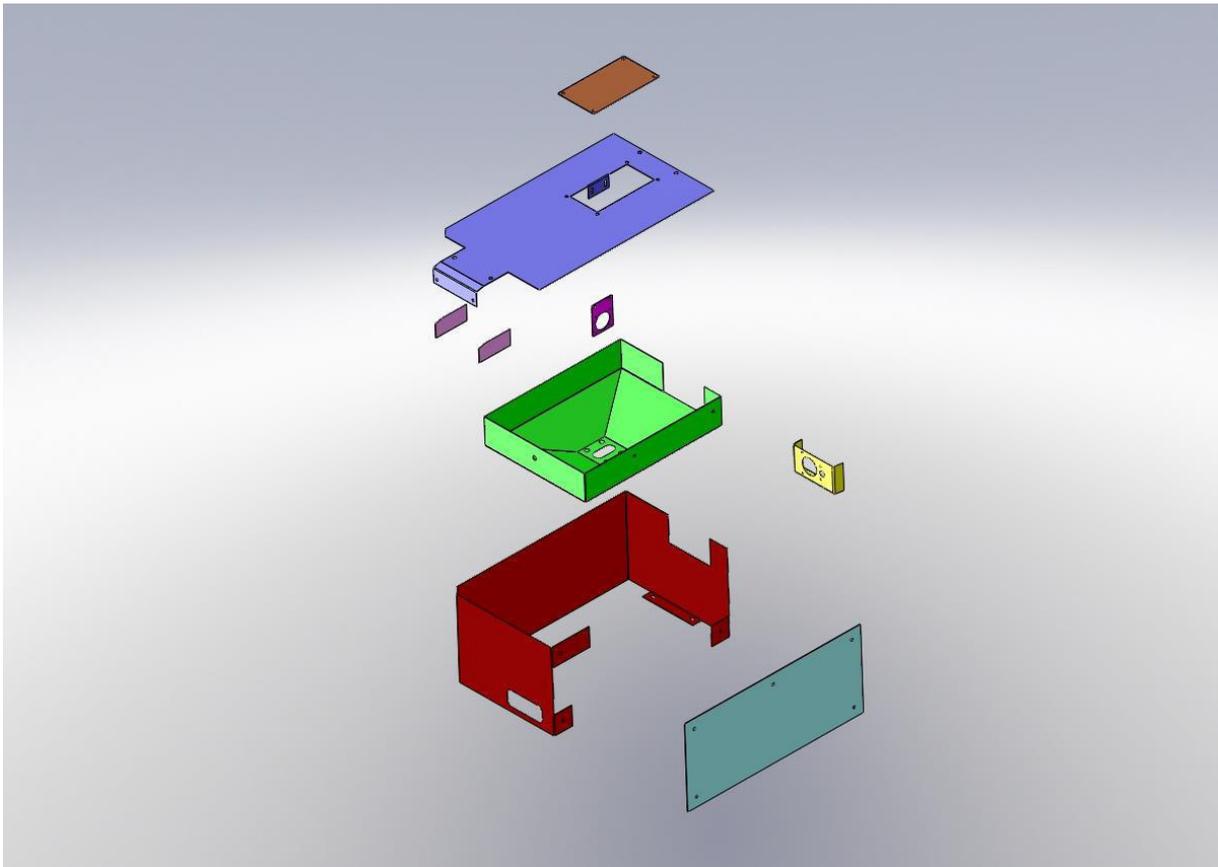


Abbildung 40: Projekt Schnellbahn, Schweißkonstruktion, Einzelteile

Quelle: haasmetal Design

Der Mantel, Trichter, Deckel, Rahmen für Einfüllklappe und die Verstärkungsrippen werden miteinander verschweißt. Zur Befestigung der Sandungsanlage, der Sitze, der Frontplatte und des Revisionsdeckels werden in der Konstruktion Blindnietmuttern verwendet. Die Anbringung der Einfüllklappe und der Sandstandsanzeige erfolgt mittels Einpressbolzen. Die Abbildung 41 zeigt eine aufgeschnittene Darstellung der Konstruktion samt Komponenten (Sandungsanlage, Sandstandsanzeige, Einfüllklappe). Der Bodenflansch des Trichters befindet sich auf einer Höhe von 165 mm, um genügend Raum für die Sandungsanlage und das nach unten führende Sandrohr frei zu lassen. Die obere Kante des Trichters befindet sich auf einer Höhe von 235 mm (siehe auch Abbildung 43). So ergibt sich ein sehr flacher Trichter mit unterschiedlichen Neigungswinkeln der einzelnen Flächen. Bei einem idealen Neigungswinkel von  $35^\circ$  würde sich ein zu kleines Sandvolumen ergeben. Bei dem Straßenbahnprojekt wird die neue Sandungsanlage mit horizontalem Sandaustritt, welche in Kapitel 8 vorgestellt wird, angewendet, um ein größeres Sandvolumen zu erreichen.

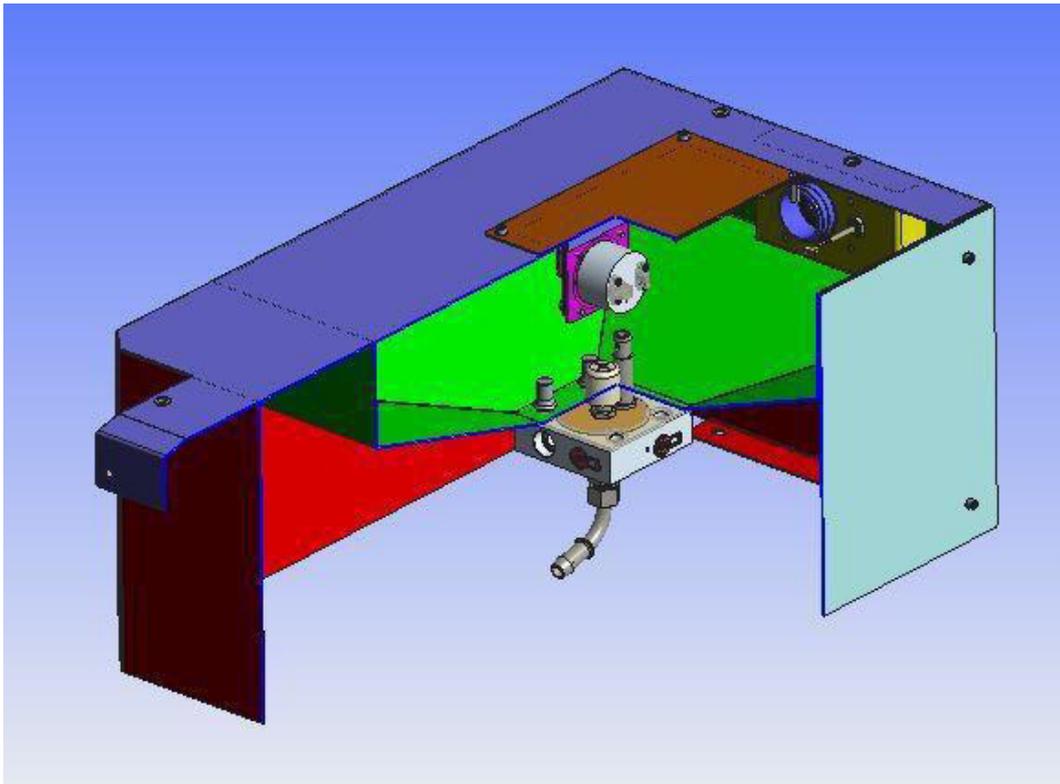
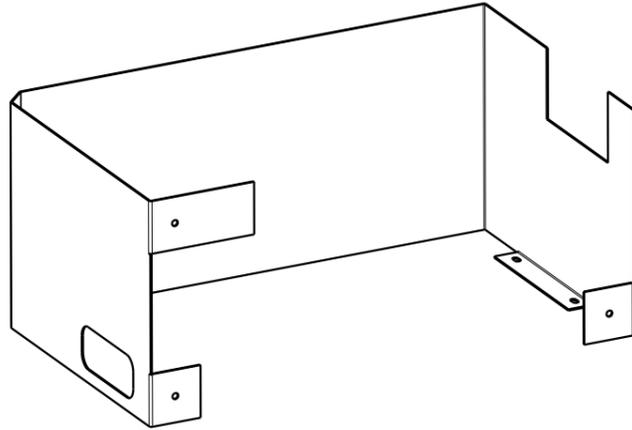


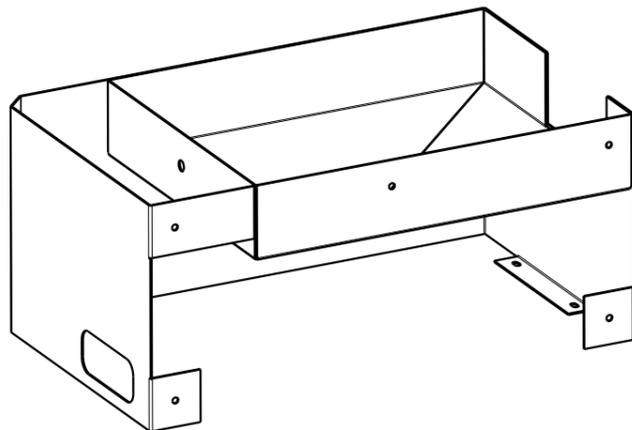
Abbildung 41: Projekt Schnellbahn, Schweißkonstruktion 3D-Schnitt

Auf den folgenden Seiten werden weitere Zeichnungen dieser Konstruktion angeführt. Die Abbildung 42 zeigt die Zusammensetzung der Schweißkonstruktion aus den einzelnen Blechteilen. In Abbildung 43 wird die fertige Schweißkonstruktion mit den Außenabmessungen und Lage der Sandungsanlage und Befüllung dargestellt. Abbildung 44 zeigt den Trichter als Einzelteil, und zwar sowohl das fertige Bauteil als auch den dafür benötigten Blechausschnitt. Zu beachten ist hier die Auswahl der Kanten, welche geschweißt und welche gebogen werden.

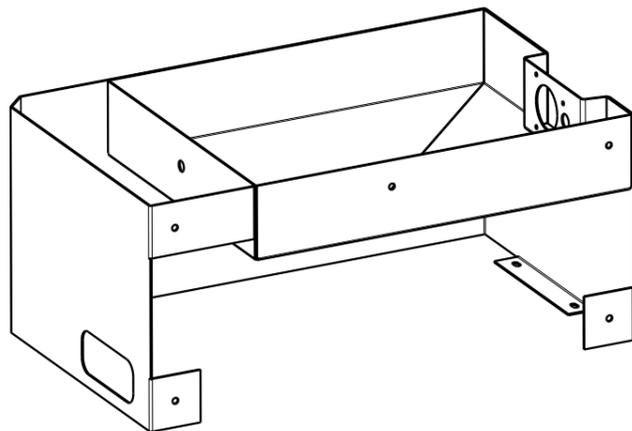
1.Mantel



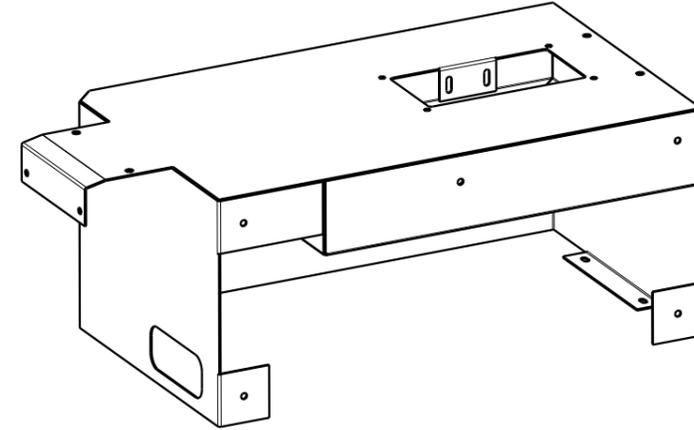
2.Trichter



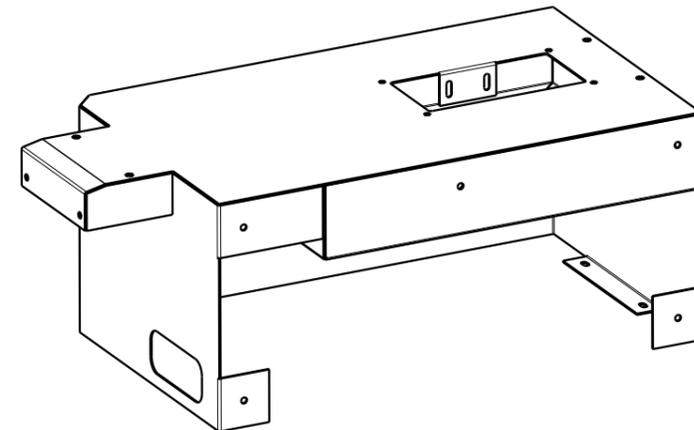
3.Mulde für Einfüllklappe



4.Deckel

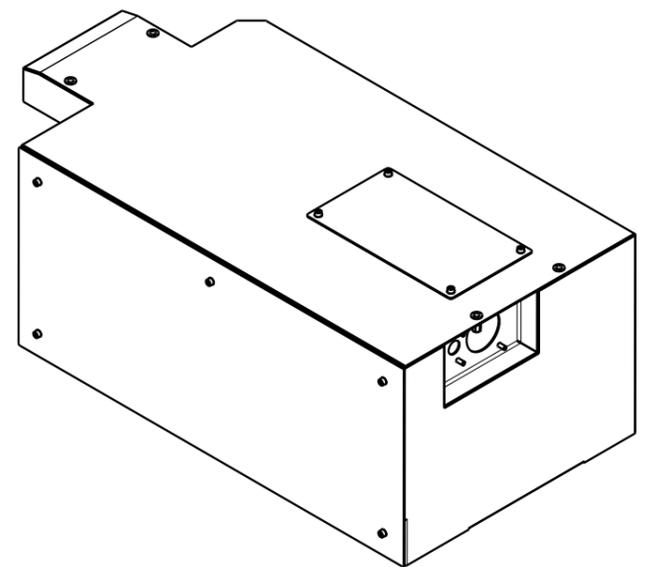
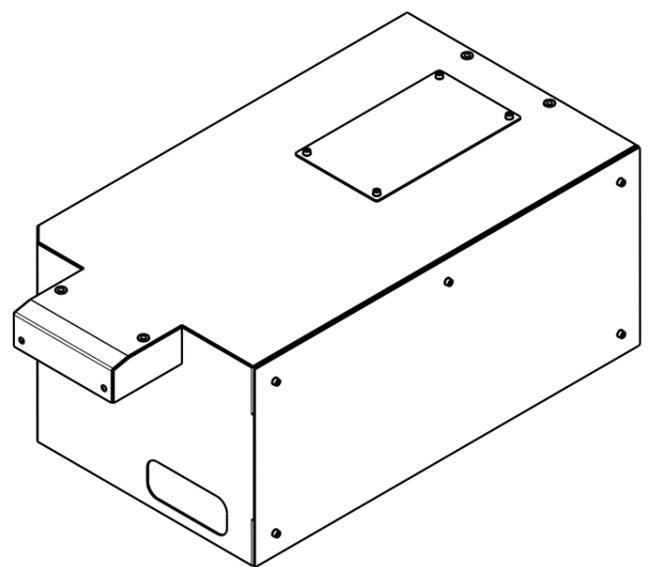
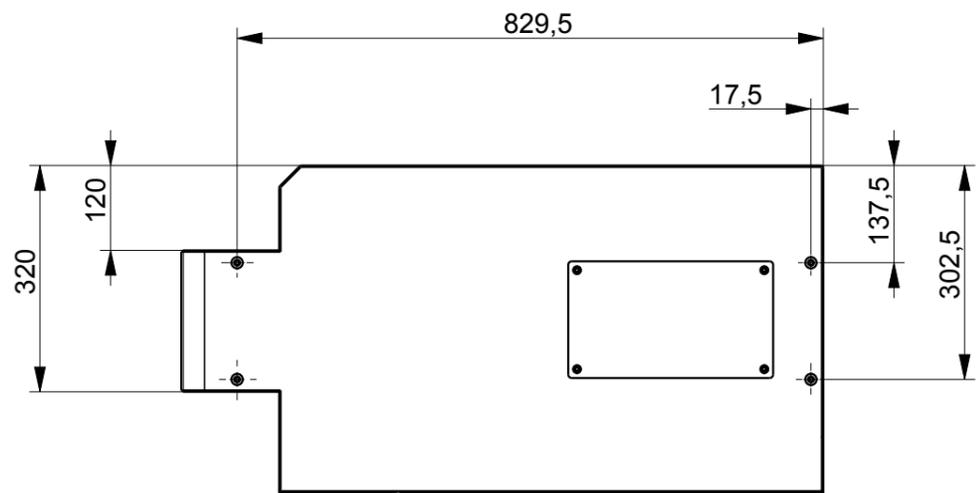
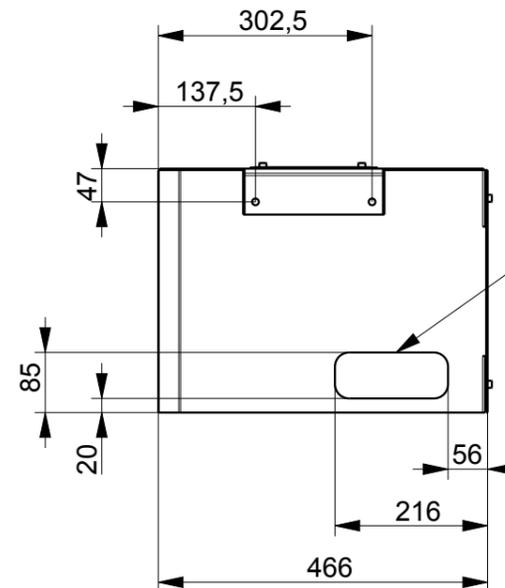
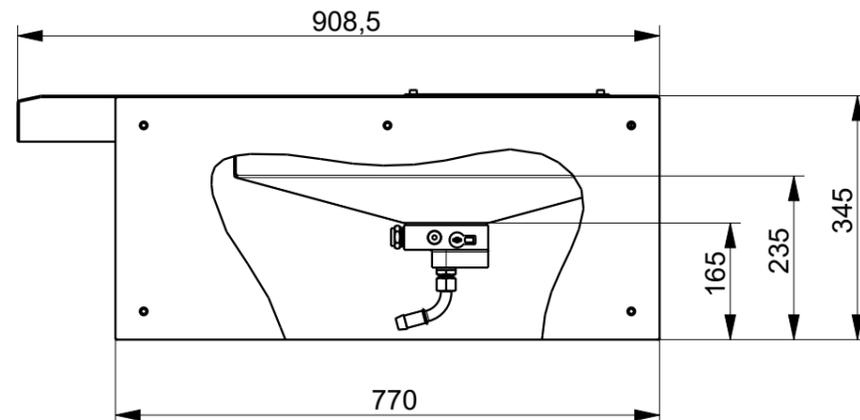
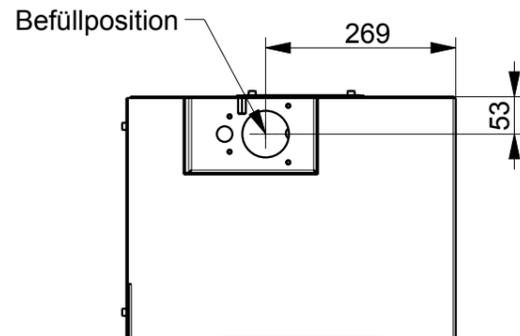
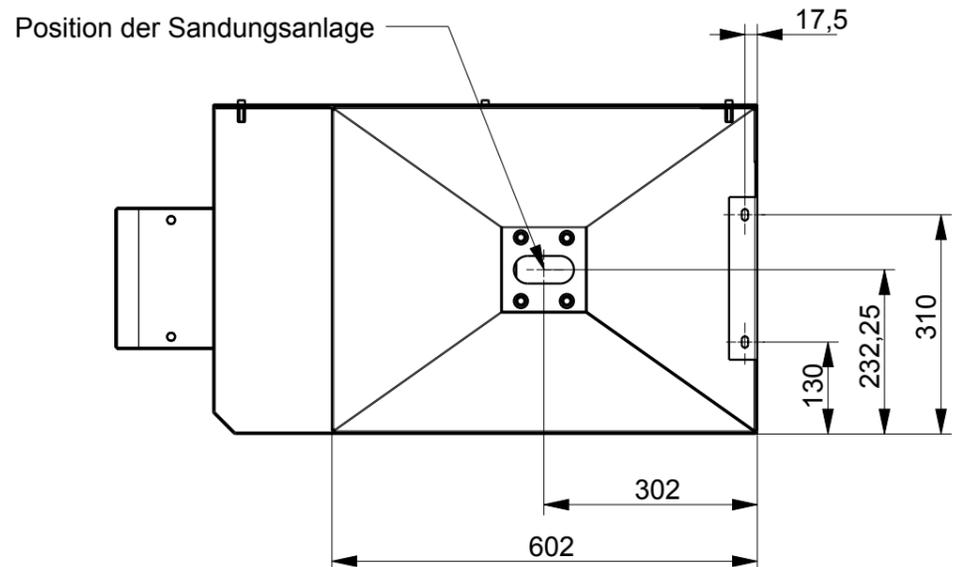


5.Verstärkungsrippen

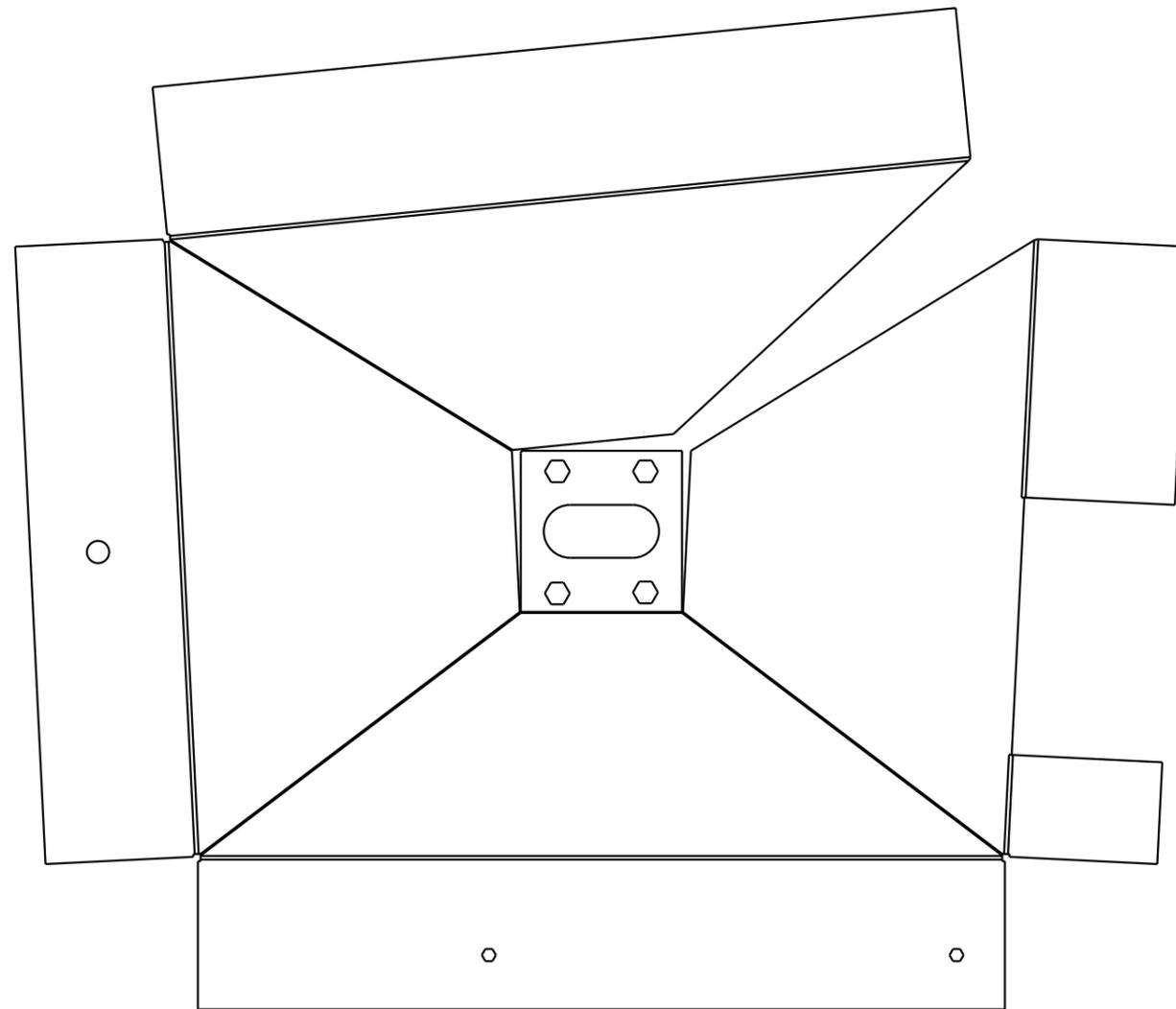


Die Frontplatte ist abnehmbar und wird mit 5 Schrauben an der Konstruktion befestigt

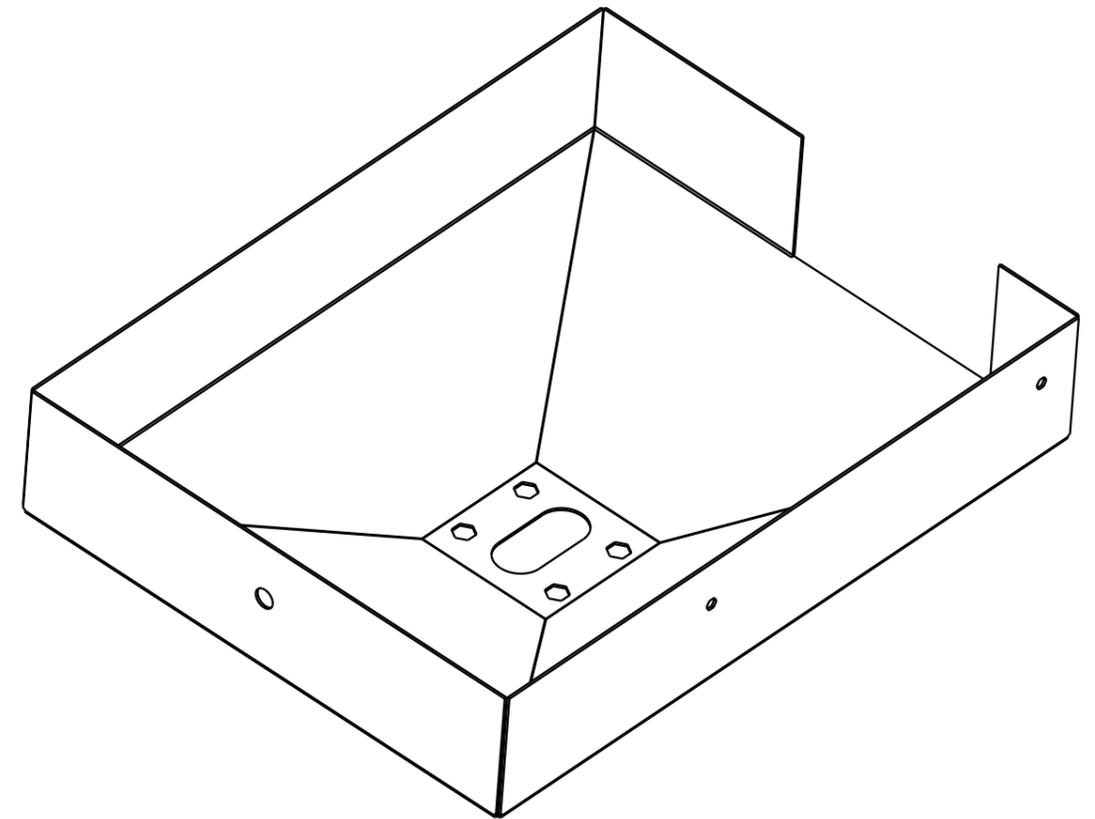
Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	Projekt Schnellbahn	Matr.nr.:	0126058
	<b>1:10</b>	Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
		TU Wien	Abgabedatum: 2015
		Abbildung 42	Blatt 1 von 1



Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	Projekt Schnellbahn	Matr.nr.:	0126058
1:10	<b>Schweißkonstruktion</b> mit Außenabmessungen	Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
	TU Wien	Abbildung 43	Blatt 1 von 1
		Abgabedatum:	2015



Blechausschnitt für Trichter



fertiger Trichter

Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	Projekt Schnellbahn, Schweißkonstruktion	Matr.nr.:	0126058
<b>1:5</b>	<b>Trichter</b>	Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
	TU Wien	Abbildung 44	Blatt 1 von 1
		Abgabedatum:	2015

## 6.1.2 Straßenbahnprojekt

In diesem Abschnitt wird das Straßenbahnprojekt behandelt, welches in Kapitel 4.2 vorgestellt wurde. Dieses Projekt wurde nicht so weit ausgearbeitet wie das Schnellbahnprojekt, da es sich noch in einer früheren Phase befand und die Firma Knorr-Bremse wieder nicht den Zuschlag erhielt. Die Abmessungen des Einbauraumes wurden vom Fahrzeughersteller bekannt gegeben, jedoch z.B. ohne Angabe von Anschlusspunkten. Die drei Konzepte zu diesem Projekt sollen zeigen, wie die verschiedenen Konstruktionen aussehen könnten und die Unterschiede dazwischen verdeutlichen. Allerdings fehlt eine eigene Kalkulation für dieses Projekt, jedoch sind hier die gleichen Größenordnungen zu erwarten wie beim Schnellbahnprojekt.

Das Sandungssystem wird auf einer Grundplatte aufgebaut, sodass die gesamte Anlage als eine Einheit ein- und ausgebaut werden kann. Der untere, trichterförmige Teil des Sandkastens ragt aus dem vorgegebenen Einbauraum heraus (siehe Abbildung 47) und durchbricht somit den Fahrzeugboden. Außerdem wird im Angebot der Firma Knorr-Bremse die neue Sandungsanlage mit horizontalem Sandaustritt, welche in Kapitel 8 vorgestellt wird, angewendet. Auf diese Weise wird das größtmögliche Volumen des Sandbehälters erreicht. Der Neigungswinkel des Trichters beträgt  $35^\circ$ , das erzielte Sandvolumen 26,9 l.

Auf den folgenden Seiten werden mehrere Abbildungen und Zeichnungen der Konstruktion dargestellt und die Konstruktion näher beschrieben.

Die Schweißkonstruktion wird aus nichtrostendem Stahl mit einer Blechstärke von 3 mm gefertigt und besteht aus folgenden Einzelteilen (siehe Abbildung 45):

- Blechteil 1
- Blechteil 2
- Grundplatte mit Verstärkungsrippe
- Befestigungslasche
- Revisionsdeckel
- Anschluss für Einfüllstutzen (2x)

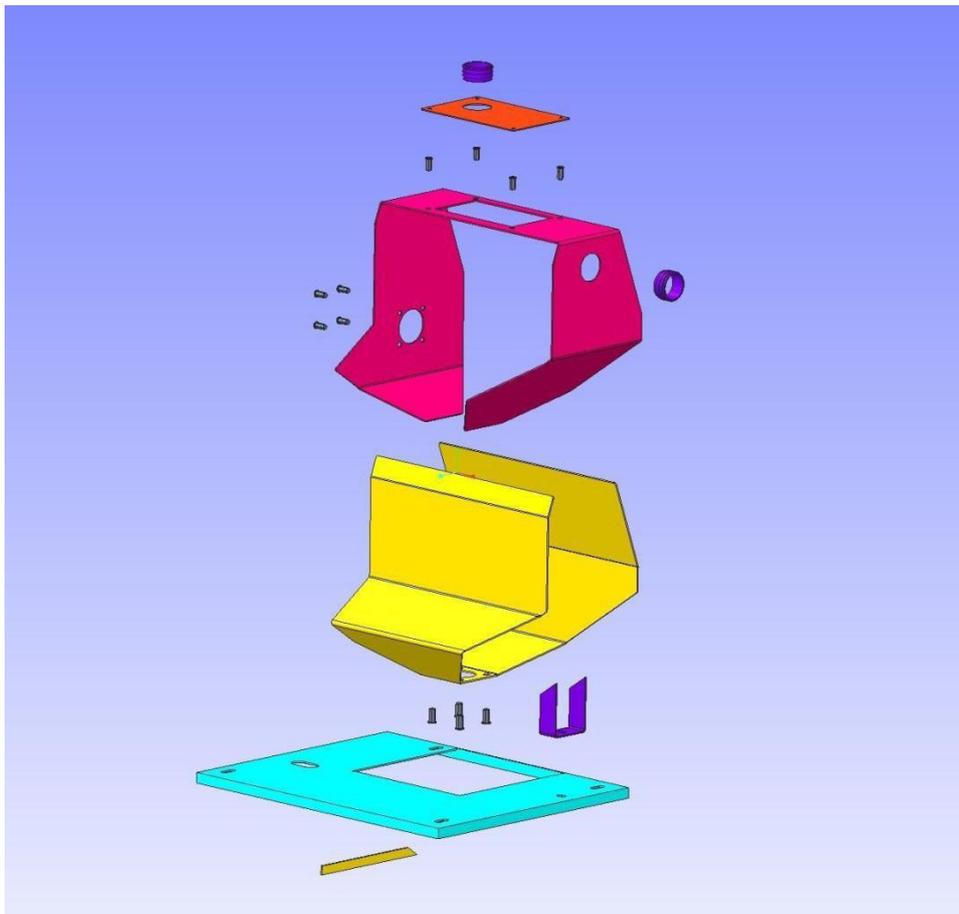


Abbildung 45: Projekt Straßenbahn, Schweißkonstruktion, Einzelteile

Alle Einzelteile außer der Revisionsdeckel werden miteinander verschweißt. Der Revisionsdeckel wird wie beim Schnellbahnprojekt mittels Blindnietmuttern angeschraubt und besitzt einen Anschluss für einen Einfüllstutzen zur Innenbefüllung.

Die Abbildung 46 zeigt eine aufgeschnittene Darstellung der Konstruktion mit folgenden weiteren Komponenten:

- Sandungsanlage
- Sandstandsanzeige
- Innenbefüllung
- Außenbefüllung
- Verdichter
- elektrische Anschlussleiste
- Ventile (in Abbildung 46 weggeschnitten)

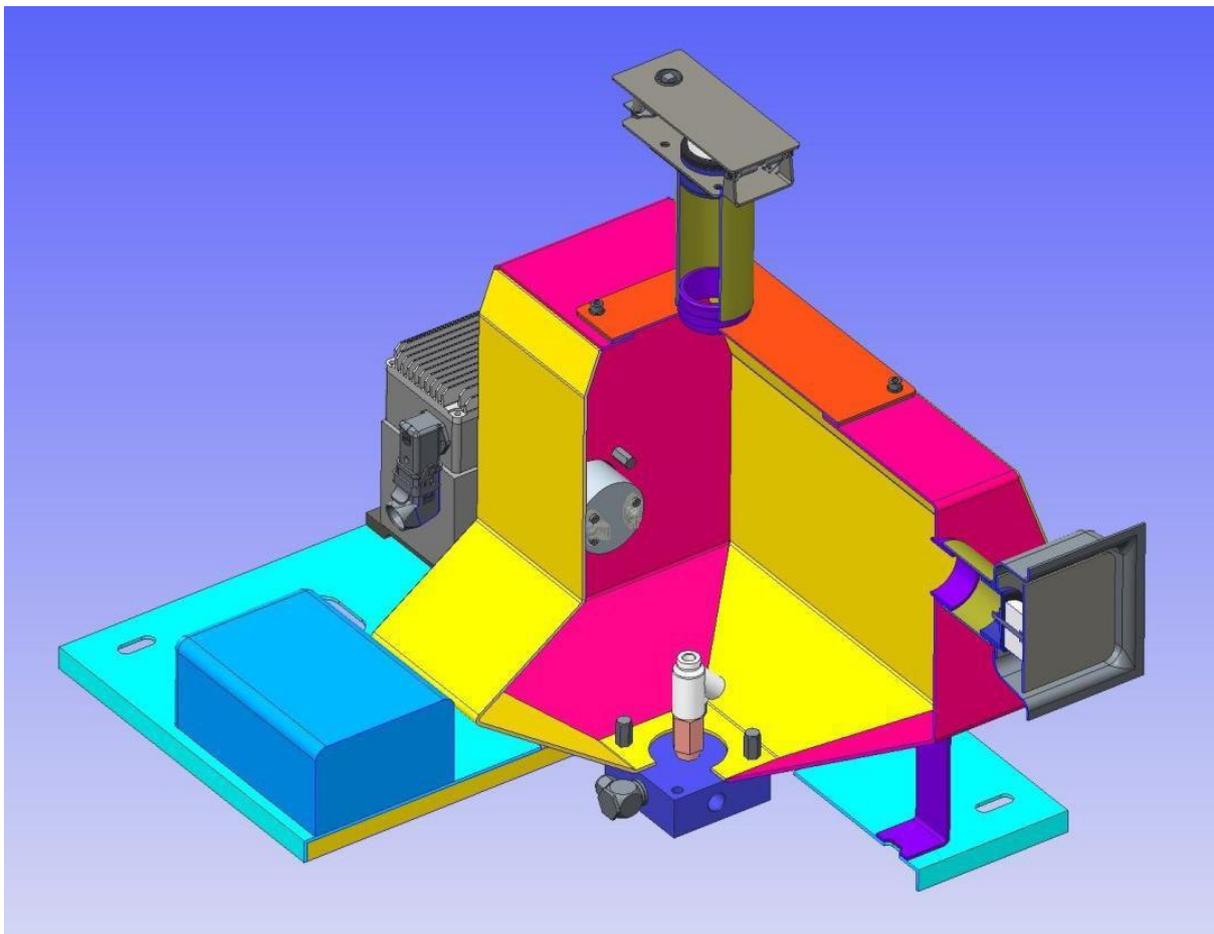
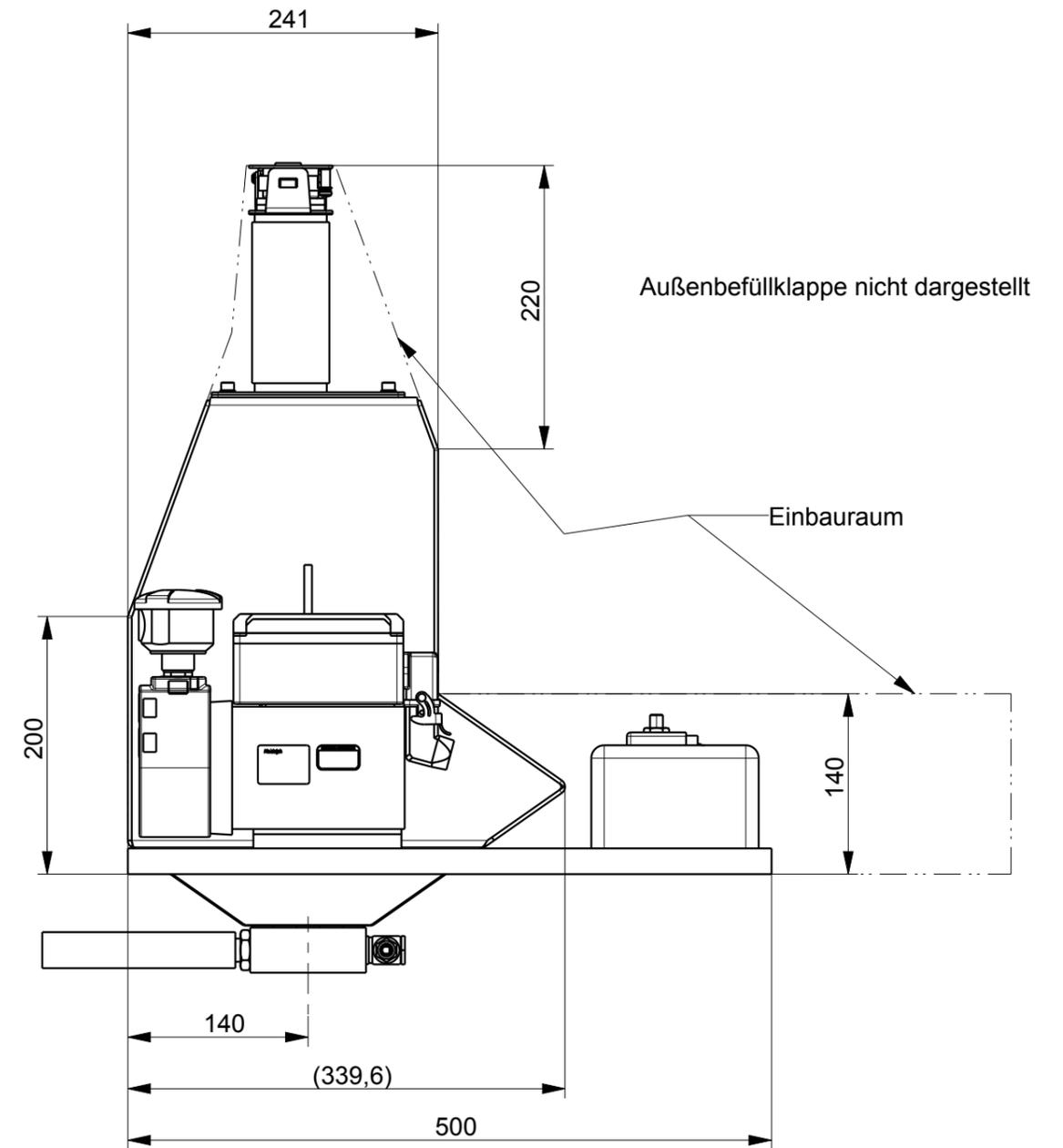
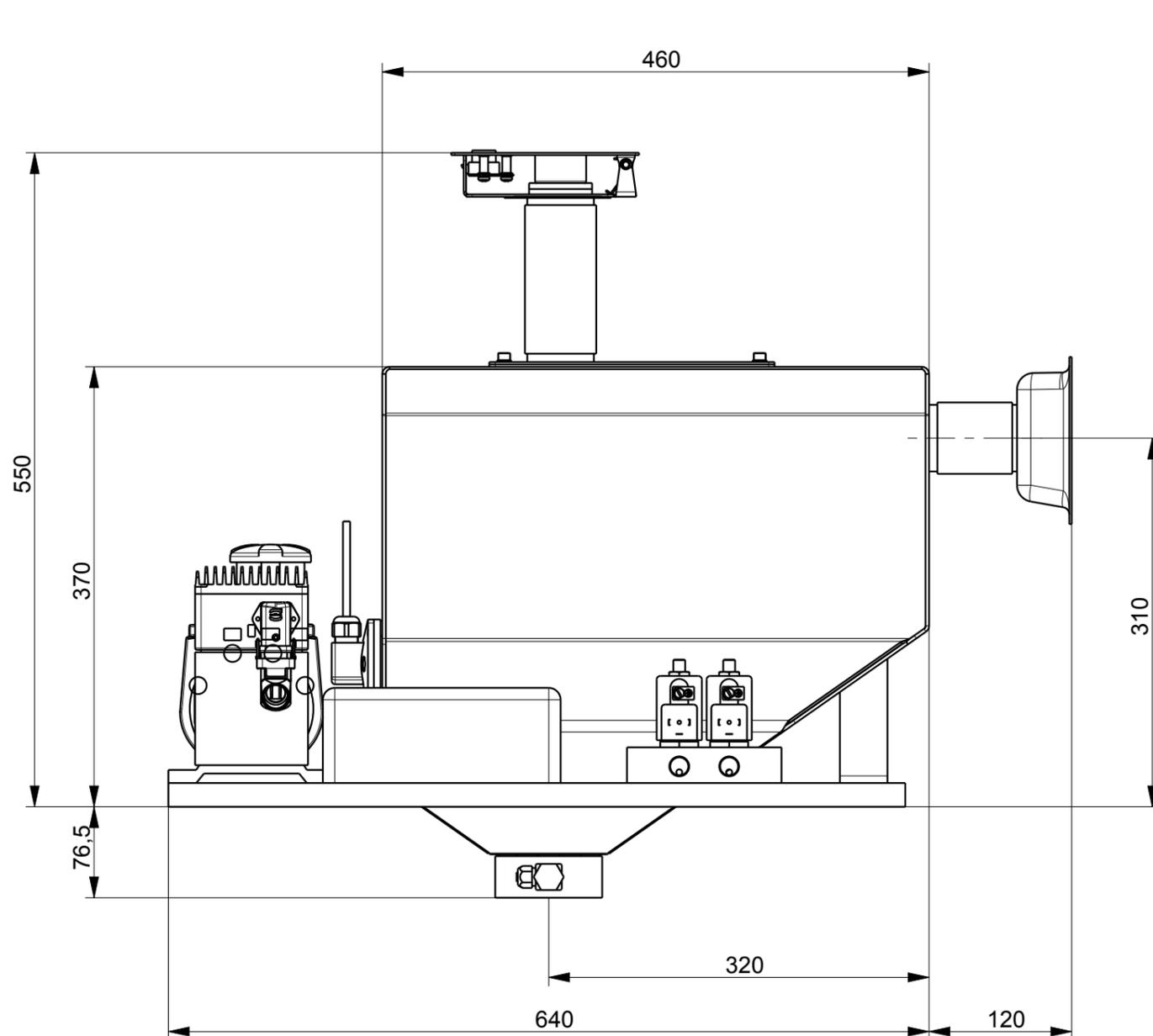
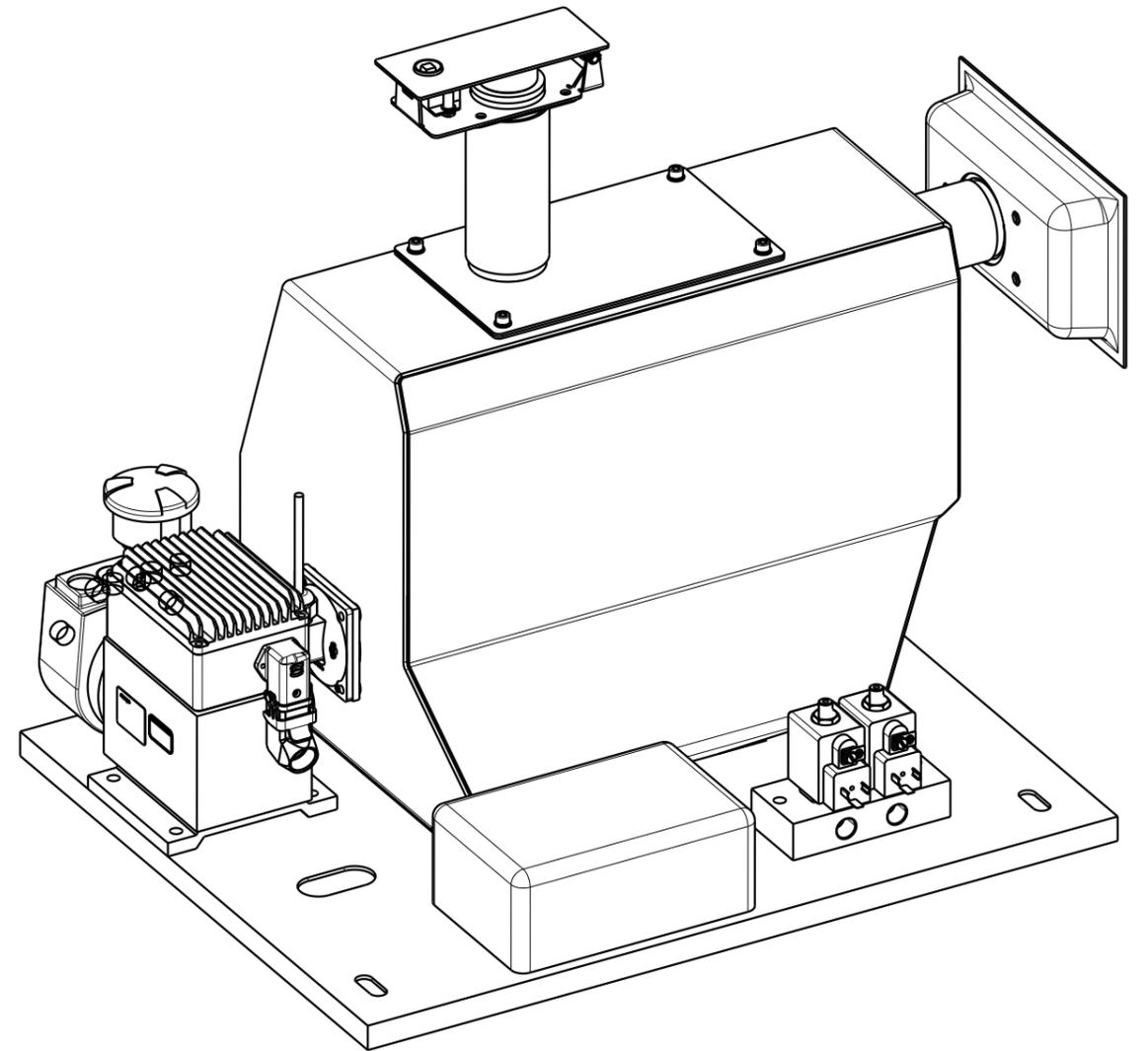
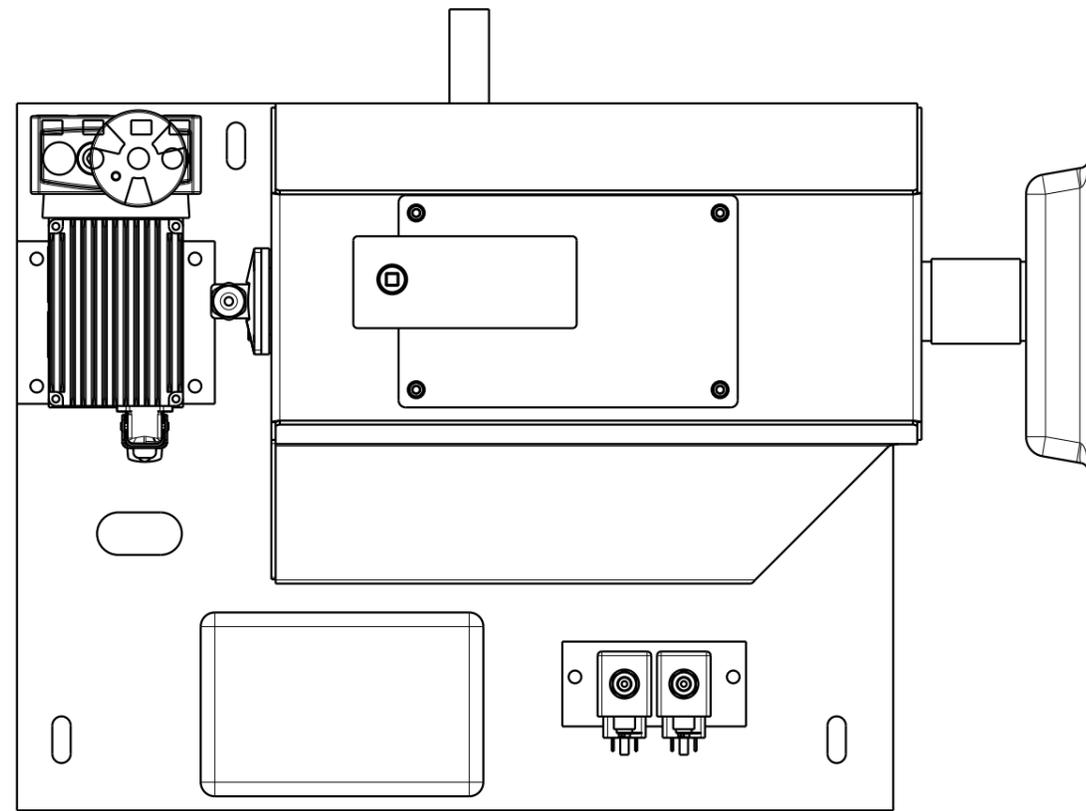


Abbildung 46: Projekt Straßenbahn, Schweißkonstruktion 3D-Schnitt

Die Abbildung 47 zeigt die fertige Schweißkonstruktion mit allen Komponenten, deren Außenabmessungen und die Lage der Sandungsanlage und Befüllung. In Abbildung 48 werden die Blechteile 1 und 2 als Einzelteile und deren Zusammenbau zum Sandkasten dargestellt. Die Blechteile sind sowohl im fertig gebogenen Zustand als auch als flacher Blechausschnitt abgebildet.

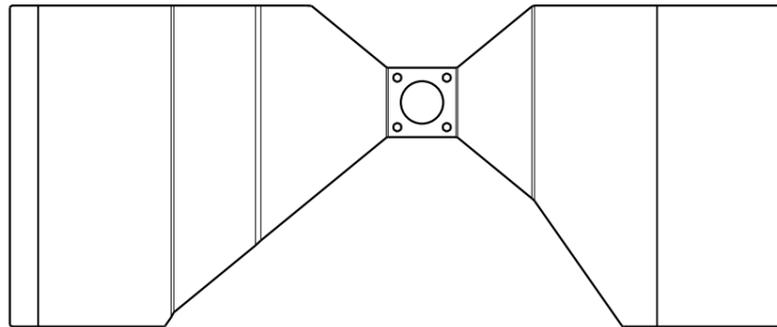


Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	Projekt Straßenbahn	Matr.nr.:	0126058
<b>1:5</b>	<b>Schweißkonstruktion mit Außenabmessungen</b>	Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
	TU Wien	Abbildung 47	Blatt 1 von 2
		Abgabedatum:	2015



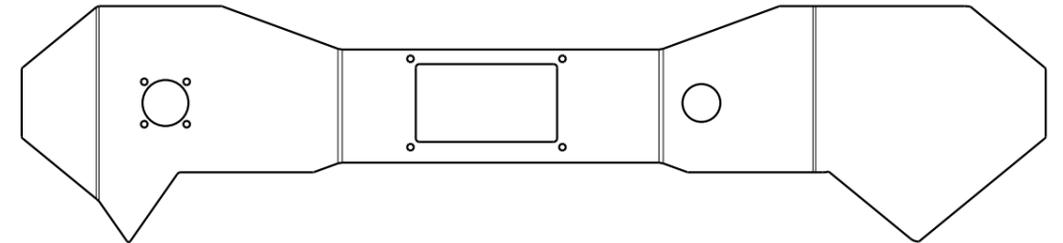
Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	Projekt Straßenbahn	Matr.nr.:	0126058
	<b>1:5</b>	Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
		TU Wien	Abgabe- datum: 2015
		Abbildung 47	Blatt 2 von 2

Blechausschnitt Teil 1

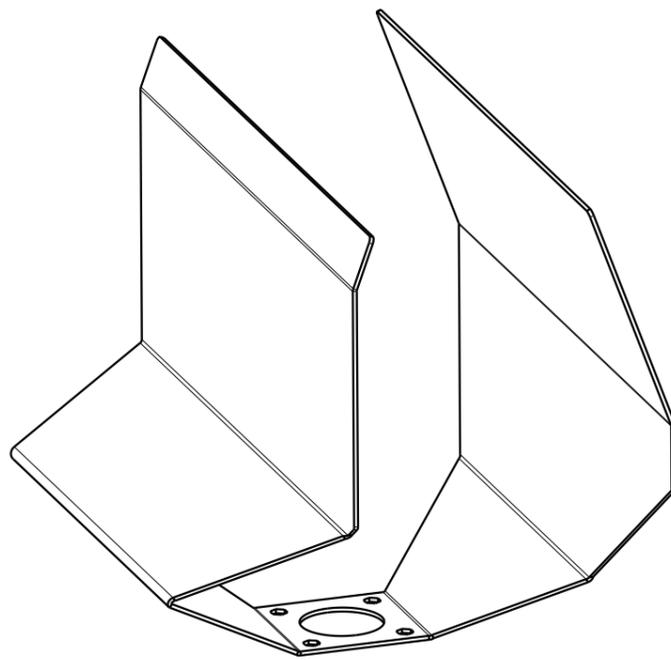


MASSTAB 1:10

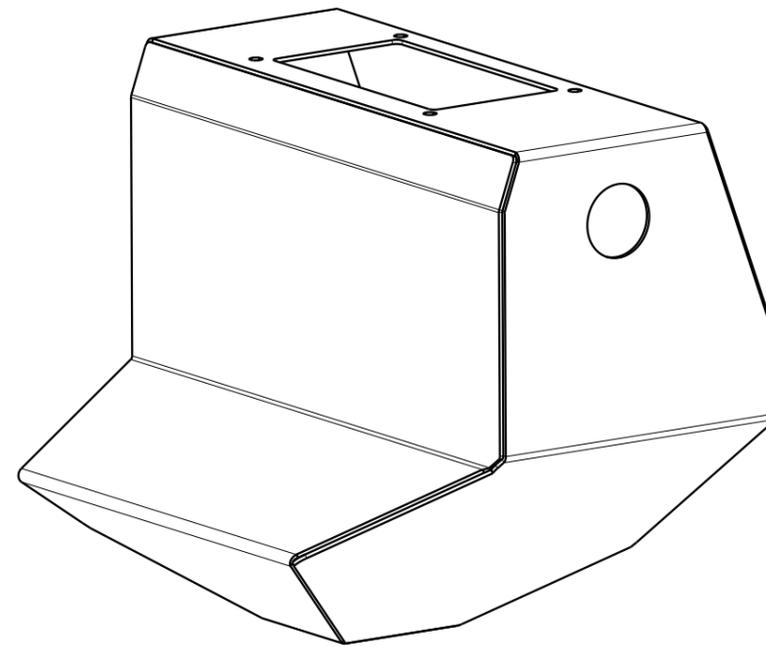
Blechausschnitt Teil 2



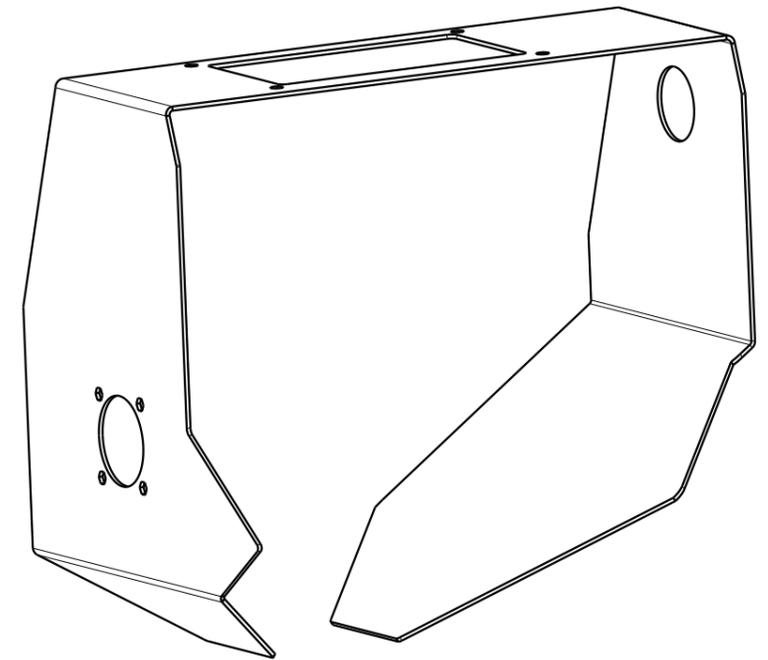
MASSTAB 1:10



Teil 1 gebogen



Zusammenbau Teil 1 und Teil 2



Teil 2 gebogen

Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	Projekt Straßenbahn, Schweißkonstruktion	Matr.nr.:	0126058
<b>1:5</b>	<b>Blechteile 1 und 2</b>	Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
	TU Wien	Abbildung 48	Blatt 1 von 1
		Abgabedatum:	2015

## 6.2 Rotationsformen

In diesem Kapitel werden Konzepte gezeigt, bei denen die Sandkästen durch das Fertigungsverfahren Rotationsformen hergestellt werden. Zur Überprüfung der Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit wurde mit der Firma Promens Hockenheim GmbH Kontakt aufgenommen. Dieses Unternehmen entwickelt und fertigt komplexe kundenspezifische Kunststoffteile und -baugruppen, die im Rotationsverfahren hergestellt werden. Die Tabelle 10 zeigt eine Übersicht über das Unternehmen:

Kontakt:	Leistungen:
Promens Hockenheim GmbH 4. Industriestrasse 18 68766 Hockenheim Deutschland cm.promens.com	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produktentwicklung</li> <li>• 3D-CAD-Konstruktion</li> <li>• FEM-Analyse</li> <li>• Mustererstellung</li> </ul>
Branchen:	Produkte:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automobilbau</li> <li>• Baumaschinen</li> <li>• Wasseraufbereitung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kraftstofftanks</li> <li>• Wasserbehälter</li> <li>• Verkleidungen</li> <li>• Armaturen Bretter</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bootsbau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bootskörper</li> <li>• Sitzbänke</li> <li>• Steuerstände</li> </ul>

Tabelle 10: Übersicht Promens Hockenheim GmbH

Quelle: cm.promens.com

In einer ersten Anfrage wurde abgeklärt, ob es hinsichtlich der Geometrie der Sandkästen prinzipiell denkbar wäre, Sandbehälter im Rotationsverfahren herzustellen und ob diese Behälter den Anforderungen im Bahnbetrieb standhalten können. Außerdem wurde ermittelt, wie hoch die Investitionen in ein Werkzeug sind und ab welchen Stückzahlen die Produktion wirtschaftlich sinnvoll ist. Bei einem Besuch bei Knorr-Bremse und nach Besichtigung von verschiedenen Sandbehältern zeigten sich die Mitarbeiter der Firma Promens sehr zuversichtlich, was die Umsetzbarkeit der Projekte betrifft. Die Informationen der Firma Promens können wie folgt zusammengefasst werden:

Werkzeug:	Aluminiumwerkzeug <ul style="list-style-type: none"> <li>• entw. gefräst aus Block nach CAD-Daten</li> <li>• oder gegossen mit Modell aus Ureol</li> </ul> 1 Werkzeug für mehrere tausend Stück
Werkstoff:	PE
Temperatureinsatzbereich:	-40°C bis +75°C
Produktionskapazität:	50-60 Teile/Woche
Kleinste rentable Produktionseinheit:	jährlich ca. 300 Stück
Einmalige Werkzeugkosten (inkl. Modell):	ca. 20.000 - 30.000 €
Produktionskosten je Stück:	ca. 150 €

Tabelle 11: Informationen von Promens Hockenheim GmbH

Bei den Stückzahlen der beiden behandelten Projekte ist die Fertigung im Rotationsverfahren also durchaus denkbar. Die angegebenen Kosten für das Werkzeug und die Produktionskosten je Bauteil sind grobe Schätzungen und nicht auf ein bestimmtes Projekt bezogen, sondern allgemein für verschiedene Sandkästen in diesem Größenbereich gültig. Die Abbildung 49 zeigt die Gesamtkosten pro Stück in Abhängigkeit von der Stückzahl und den Werkzeugkosten.

Der Anteil der Werkzeugkosten an den Gesamtkosten ist ab einer Stückzahl von etwa 1.000 relativ gering und somit werden die Kosten auch bei höheren Stückzahlen nicht mehr wesentlich niedriger. Die untere Grenze für das Rotationsverfahren wird mit jährlich 300 Stück angegeben. Die Gesamtkosten je Einheit liegen beispielweise bei einer Produktion von 1.000 Stück und Werkzeugkosten von 30.000 € bei 180,- € und damit deutlich unter den Kosten für die geschweißten Behälter (307,98 € je Einheit; siehe Kapitel 6.1.1).

Das Diagramm zeigt auch die Auswirkungen, falls das Werkzeug wesentlich teurer ausfallen sollte als in der ursprünglichen Schätzung von Promens angegeben. Bei einer entsprechenden Stückzahl wie bei den beiden in dieser Arbeit behandelten Projekten werden immer noch niedrigere Kosten erzielt als bei geschweißten Behältern.

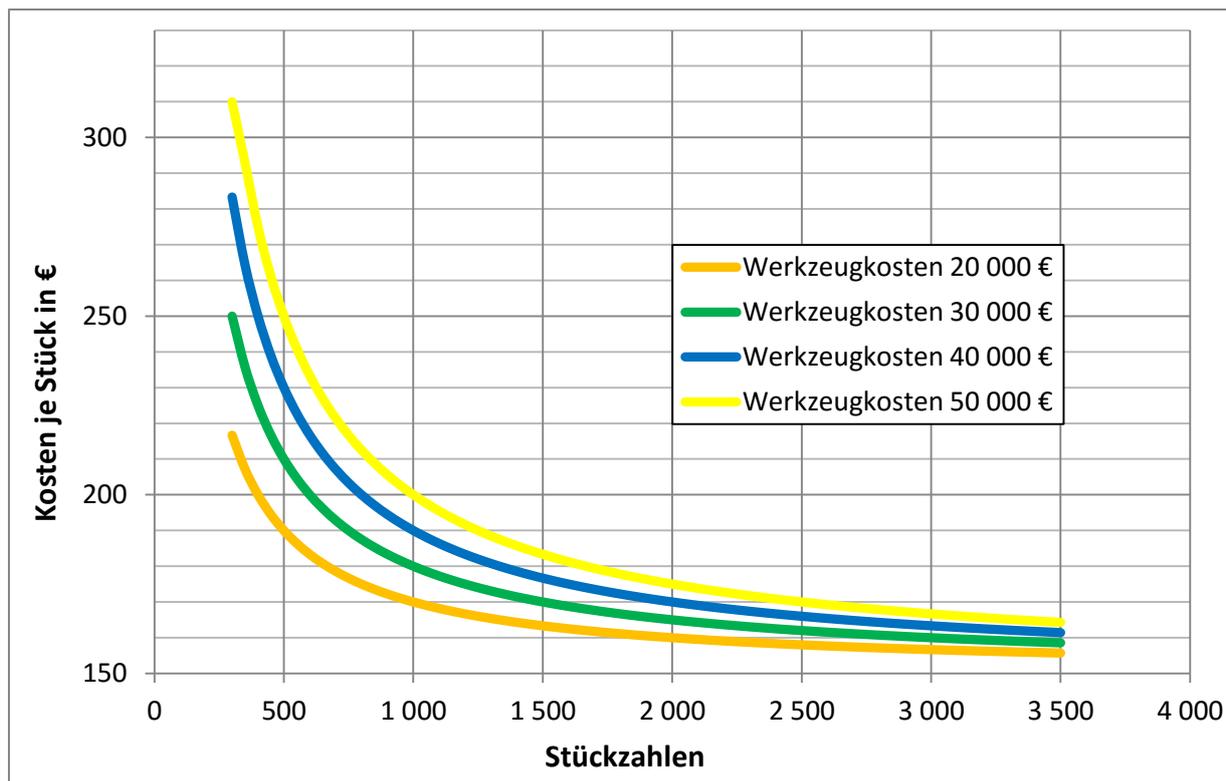


Abbildung 49: Gesamtkosten pro Stück in Abhängigkeit von der Stückzahl und den Werkzeugkosten

### 6.2.1 Schnellbahnprojekt

Für die beiden Projekte gibt es keine eigenen genaueren Kalkulationen, da beide Projekte nicht verwirklicht wurden. Die tatsächlichen Kosten hätten erst bei einer weiteren Konkretisierung der Projekte ermittelt werden können. Die folgenden Konzeptentwürfe sollen die Konstruktionsmöglichkeiten des Rotationsverfahrens aufzeigen.

Die Abbildung 50 zeigt den Aufbau des Rotationskonzepts für das Schnellbahnprojekt. Hier erkennt man den grundlegenden Vorteil dieses Fertigungsverfahrens. Während die Schweißkonstruktion aus mehreren Einzelteilen (Mantel, Trichter, Deckel, Rahmen für Einfüllklappe, Verstärkungsrippen, siehe Kapitel 6.1.1) zusammengesetzt wird, besteht die Sitzkiste des Rotationskonzepts nur aus einem einzigen Teil. Daran werden der Deckel und die Frontplatte und die weiteren Komponenten mittels Schraubverbindung angebracht. Der Kasten wird aus PE gefertigt, hat eine Wandstärke von 8 mm und wird in einem Arbeitsgang hergestellt. Dabei ist es möglich, verschiedene Funktionen und Einlegeteile zu integrieren.

Zur Befestigung der Sandungsanlage, der Sandstandsanzeige, der Sitze und der beiden Deckel werden während des Herstellungsprozesses Gewindeeinsätze aus Metall in den Kasten einrotiert. Die Anbringung der Einfüllklappe erfolgt mittels Einpressbolzen. Sollte sich herausstellen, dass auf Grund der größeren Toleranzen dieses Fertigungsverfahrens und der unebenen größeren Flächen die Anbringung der Komponenten in dieser Weise nicht praktikabel ist, stehen folgende konstruktive Lösungen zur Wahl:

- Position der Befestigungspunkte zu ungenau:
  - Löcher für Durchgangsverschraubung nachträglich bohren
  - Gewindeeinsätze nachträglich eindrehen
- Bodenflansch uneben bzw. Durchbiegung bei Montage der Sandungsanlage:
  - Sandungsanlage mit Gegenplatte im Inneren des Trichters verschrauben
  - Verstärkungsplatte aus Metall in den Bodenflansch einrotieren

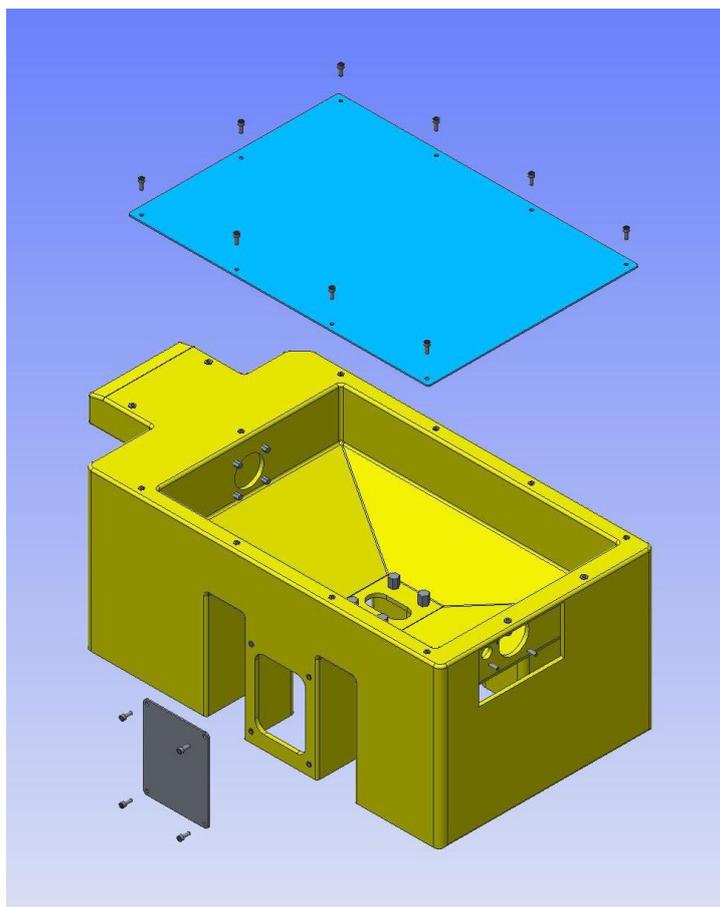


Abbildung 50: Projekt Schnellbahn, Rotationskonstruktion, Einzelteile

Zur Erhöhung der Steifigkeit werden die Vorder- und die Rückwand des Kastens mit jeweils zwei Vertiefungen versehen. Zusätzlich werden Berührungspunkte zwischen dem Trichter und diesen Vertiefungen geschaffen, an denen die einzelnen Wände verschmelzen. So wird der trichterförmige Teil des Kastens, der den Sand aufnimmt, direkt von den Versteifungen der Außenwände abgestützt. Die Abbildung 53 zeigt dieses Konstruktionsprinzip.

Eine Besonderheit bei diesem Projekt ist, dass auf dem Sandkasten Sitze montiert werden. Die Sitze werden normalerweise mit einem Sitzfuß im Fußboden und mit einem Wandadapter in der Seitenwand befestigt, siehe Kapitel 4.1.2. In diesem Konzeptentwurf trägt der Kasten selbst die Sitze und ist zu ihrer Aufnahme mit Gewindeeinsätzen versehen. Es wäre außerdem denkbar, zur Verstärkung des Kastens den vorhandenen Sitzfuß und Wandadapter in die Rotationskonstruktion zu integrieren.

Die Abbildung 51 zeigt eine aufgeschnittene Darstellung der Konstruktion samt den Komponenten Sandungsanlage, Sandstandsanzeige und Einfüllklappe. In Abbildung 52 wird die Rotationskonstruktion mit den Außenabmessungen dargestellt. Die Abbildung 53 zeigt den Kasten als Einzelteil in Schnittdarstellung. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei diesen Ausführungen um einen Entwurf handelt, der die Unterschiede zwischen den verschiedenen Fertigungsverfahren zeigen soll. Im Falle der Realisierung des Projektes würde eine fertigungsgerechte Detailkonstruktion vom Hersteller erstellt werden.

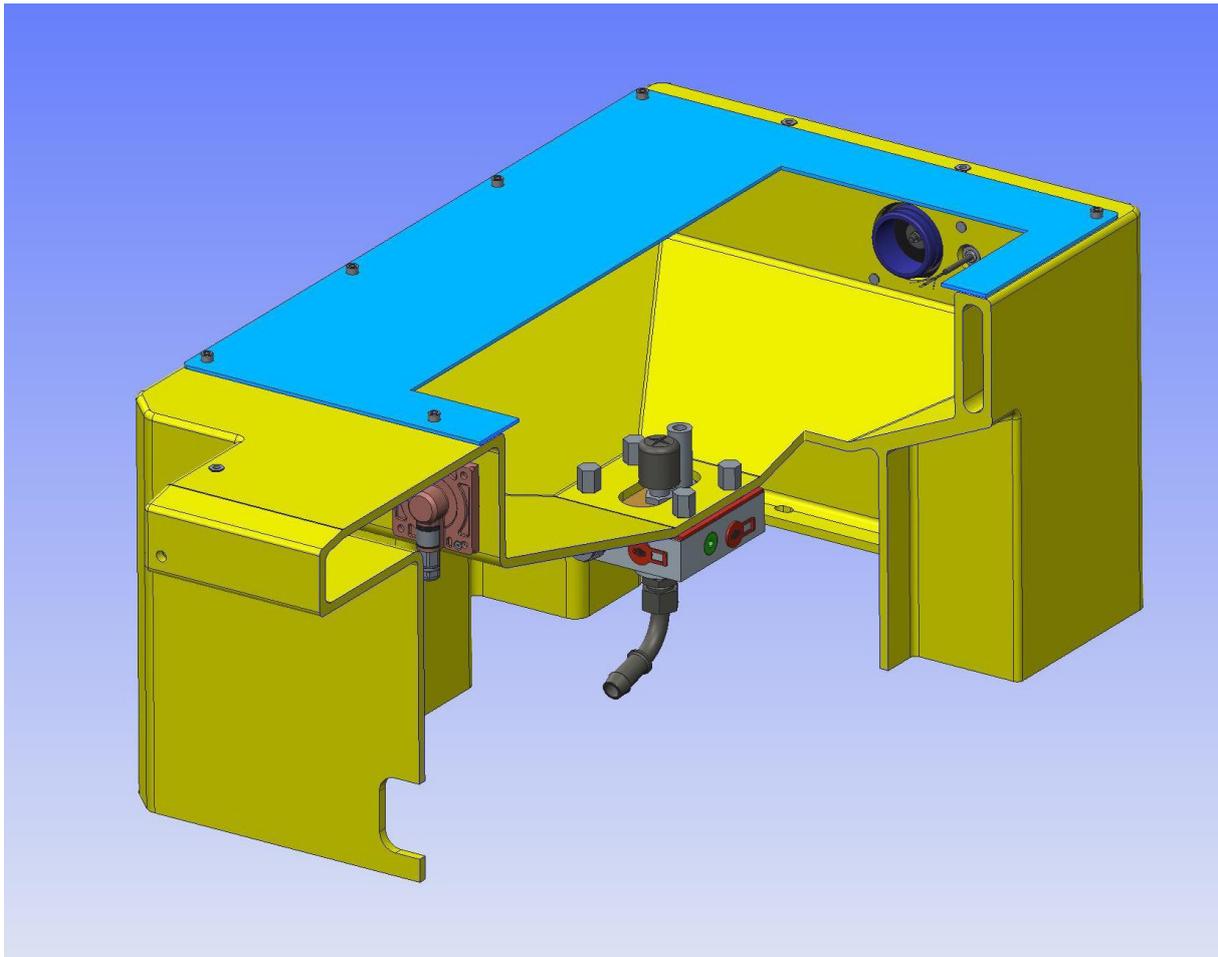
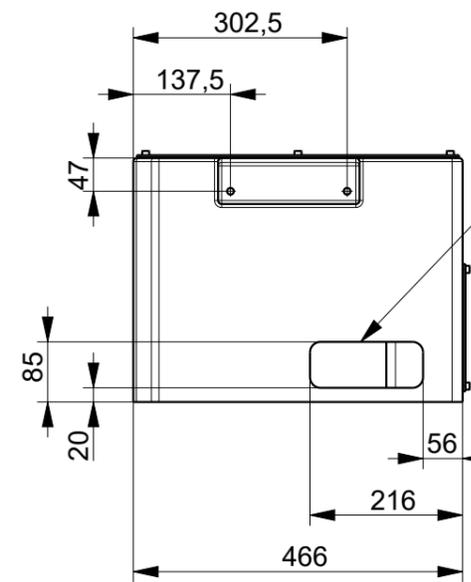
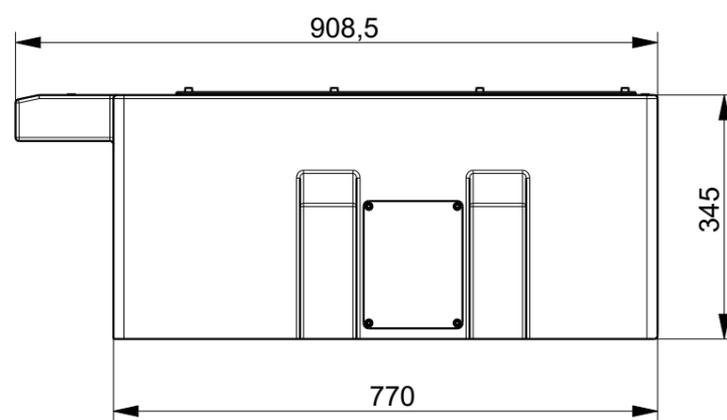
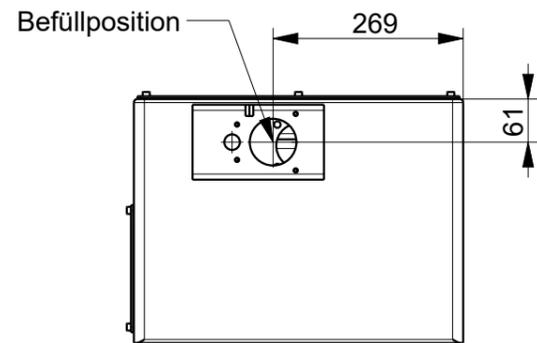
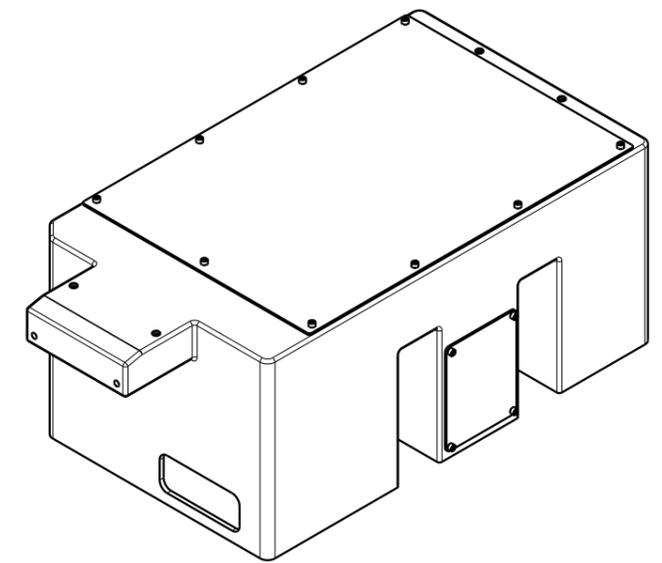
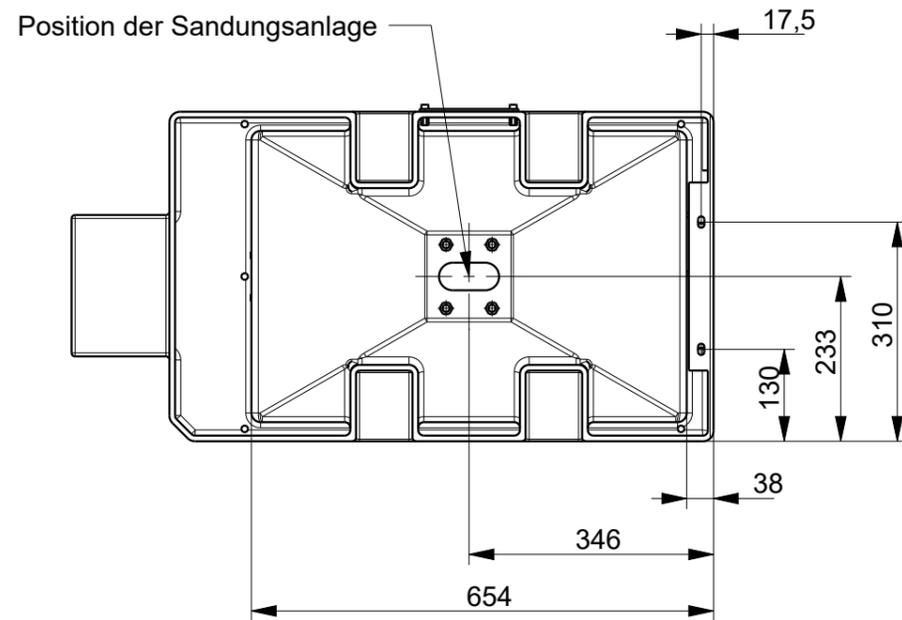
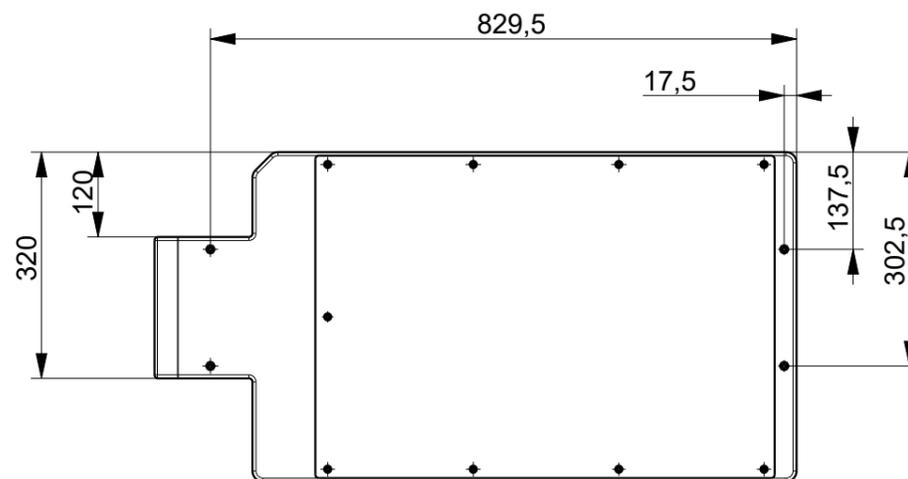
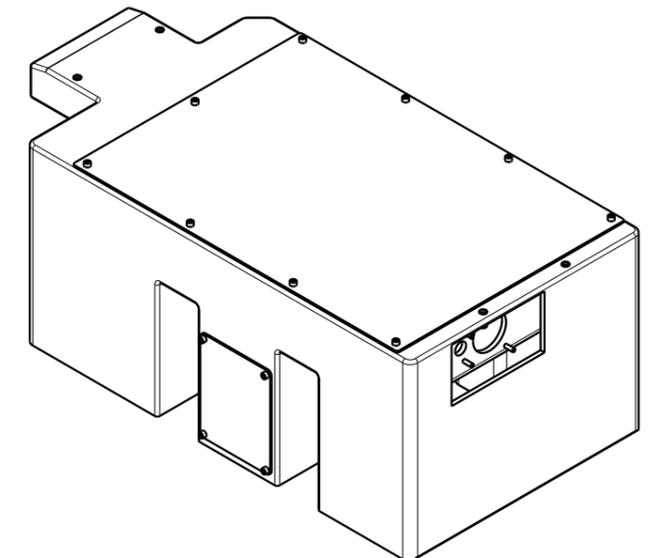


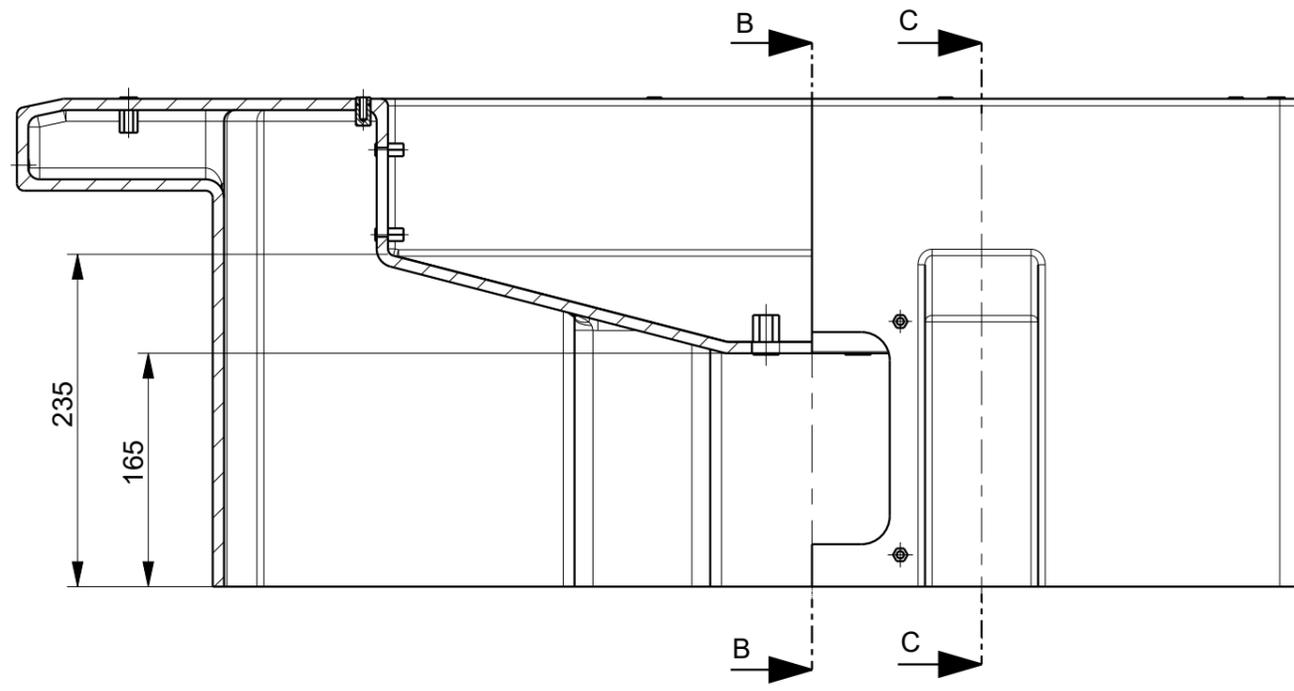
Abbildung 51: Projekt Schnellbahn, Rotationskonstruktion 3D-Schnitt



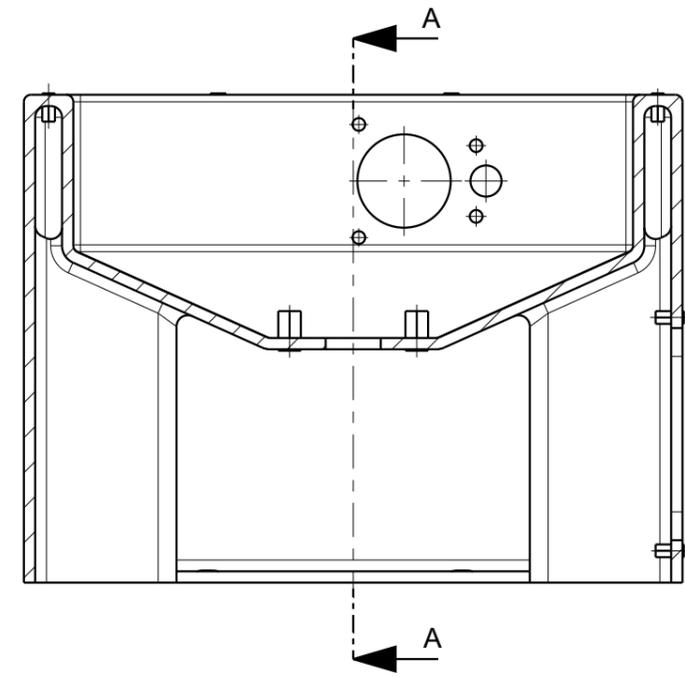
Öffnung für Sandschlauch und Druckluftversorgung



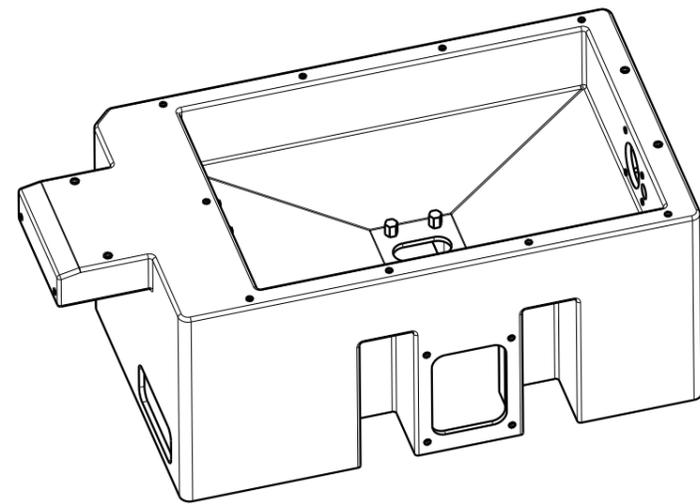
Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	Projekt Schnellbahn	Matr.nr.:	0126058
<b>1:10</b>	<b>Rotationskonstruktion mit Außenabmessungen</b>	Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
	TU Wien	Abgabedatum:	2015
	Abbildung 52	Blatt 1 von 1	



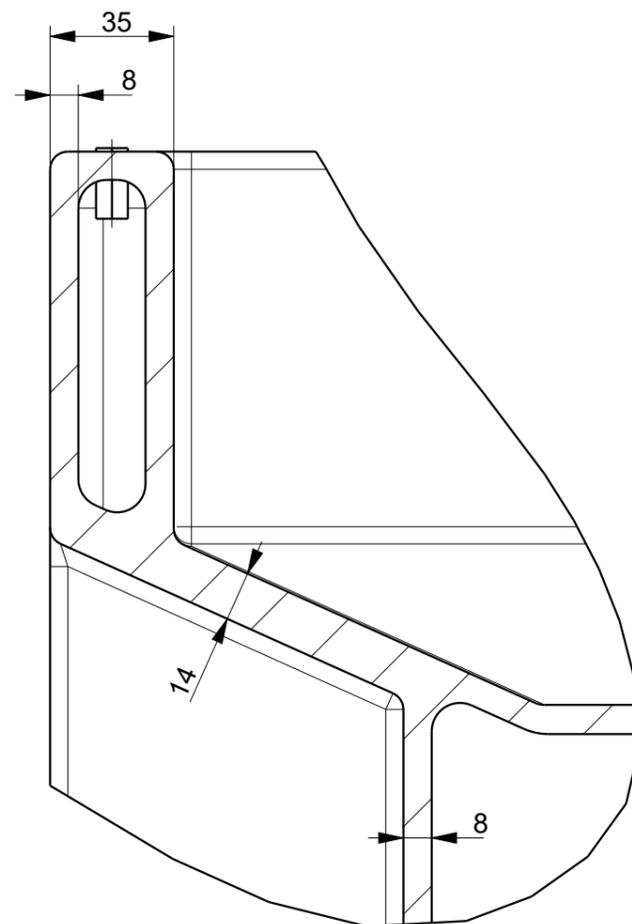
SCHNITT A-A



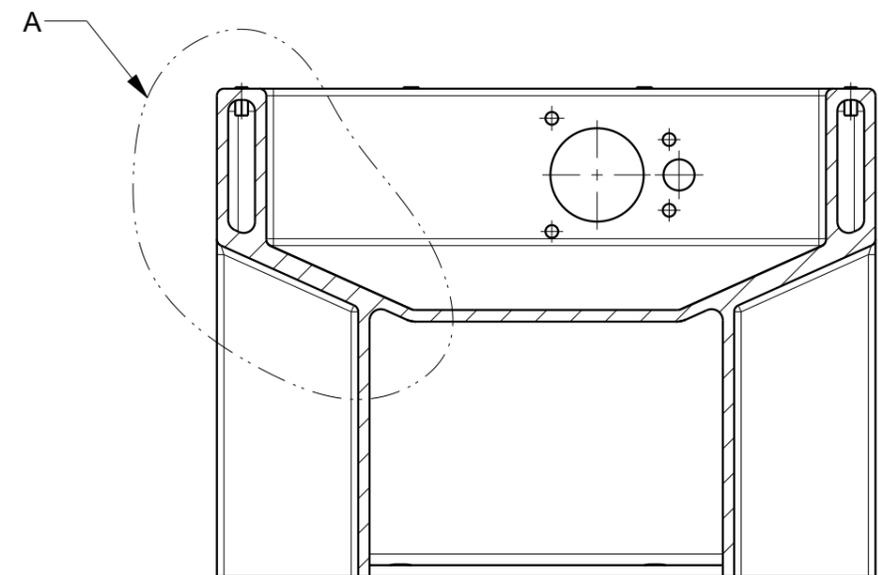
SCHNITT B-B



3D Ansicht (1:10)



A (1:2)  
Detailansicht der Versteifung



SCHNITT C-C

Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	Projekt Schnellbahn, Rotationskonstruktion	Matr.nr.:	0126058
<b>1:5</b>	<b>Kasten</b>	Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
	TU Wien	Abbildung 53	Blatt 1 von 1
		Abgabedatum:	2015

## 6.2.2 Straßenbahnprojekt

Der Sandkasten wird wieder als ein Teil in einem Arbeitsgang hergestellt, die Wandstärke ist 8 mm. Die Grundplatte ist ähnlich der Grundplatte bei der Schweißkonstruktion: Es wird eine Platte aus Metall mit Verstärkungsrippen verwendet, nur der Ausschnitt zur Aufnahme des Sandkastens ist unterschiedlich. Grundplatte und Sandkasten werden mittels Schraubverbindung zusammengefügt, dazu sind im Sandkasten Gewindeeinsätze einrotiert. Auch zur Befestigung des Revisionsdeckels, der Sandungsanlage und der Sandstandsanzeige werden Gewindeeinsätze verwendet.

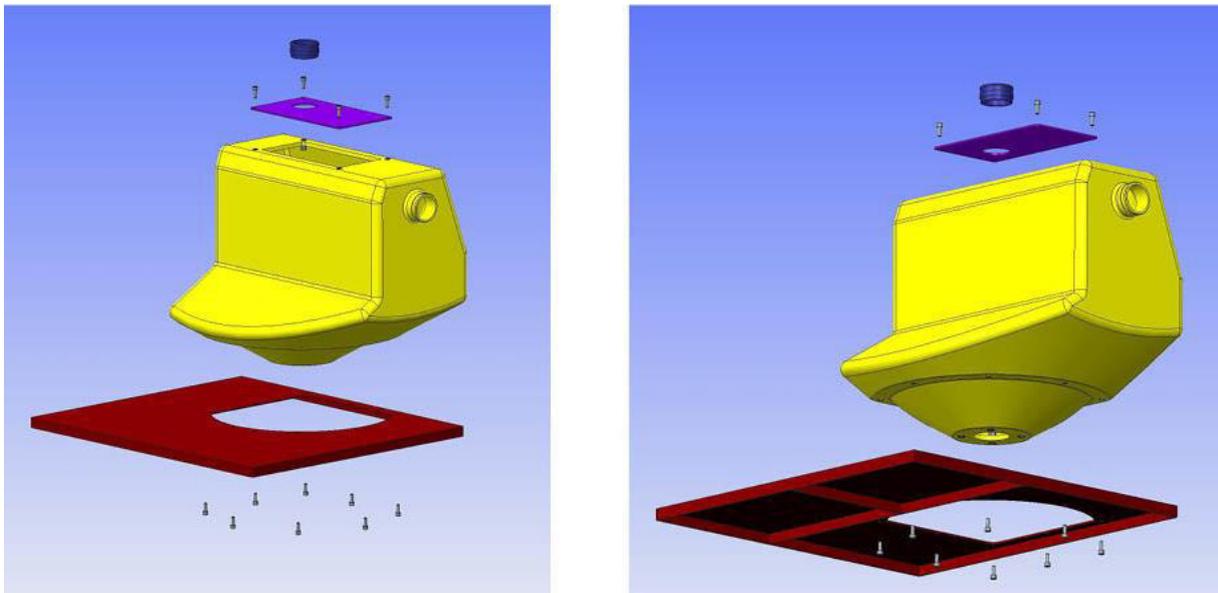


Abbildung 54: Projekt Straßenbahn, Rotationskonstruktion, Einzelteile

In Abbildung 54 ist eine Explosionsansicht der Grundkonstruktion mit Grundplatte, Sandkasten und Revisionsdeckel dargestellt. Die Abbildung 55 zeigt eine aufgeschnittene Darstellung der Konstruktion samt den Komponenten Sandungsanlage, Sandstandsanzeige, Innen- und Außenbefüllung, Verdichter und elektrische Anschlussleiste. Die Magnetventile sind in dieser Ansicht weggeschnitten. In Abbildung 56 ist die Konstruktion mit allen Komponenten und den Außenabmessungen dargestellt. Die Abbildung 57 zeigt Grundplatte und Sandkasten in Schnittdarstellung, wodurch die Verbindung der beiden Teile gut erkennbar ist.

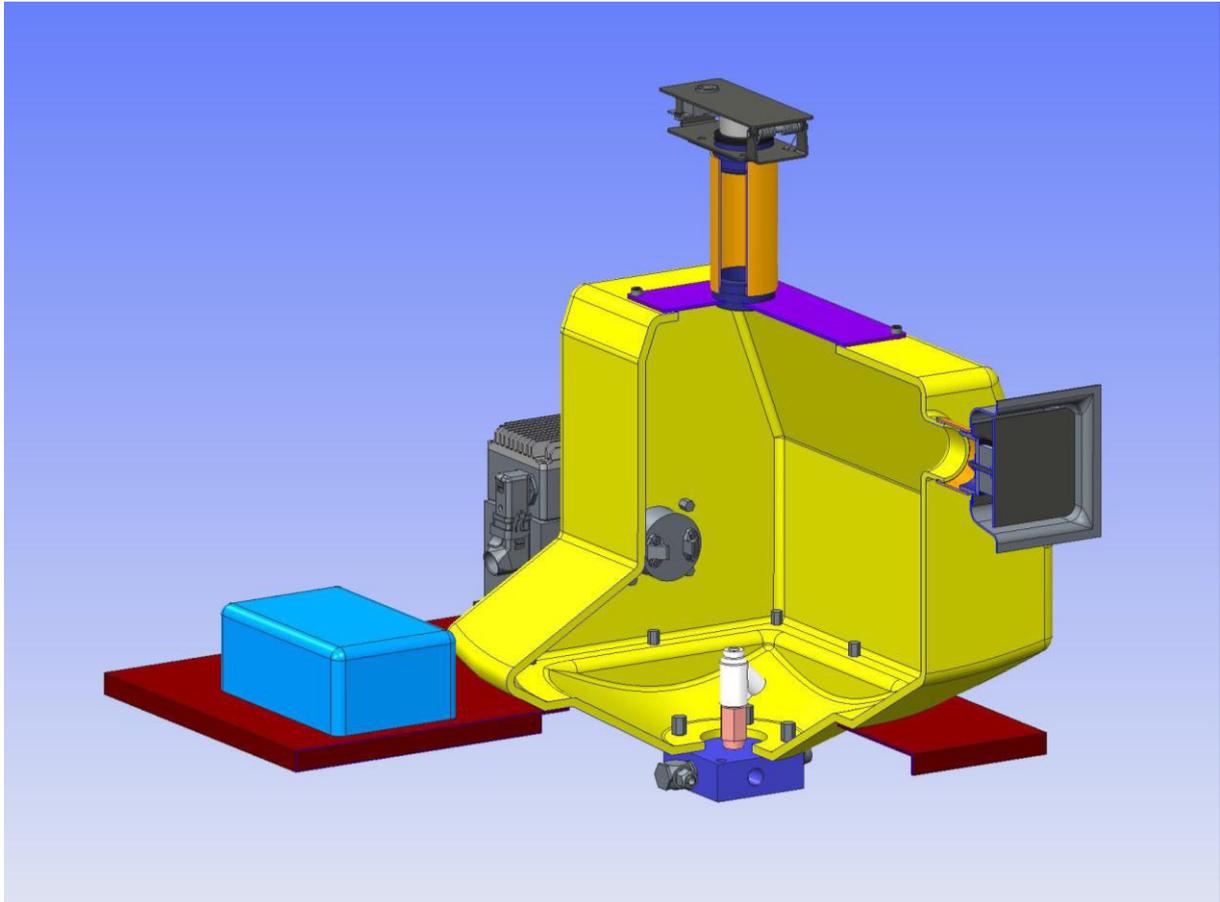
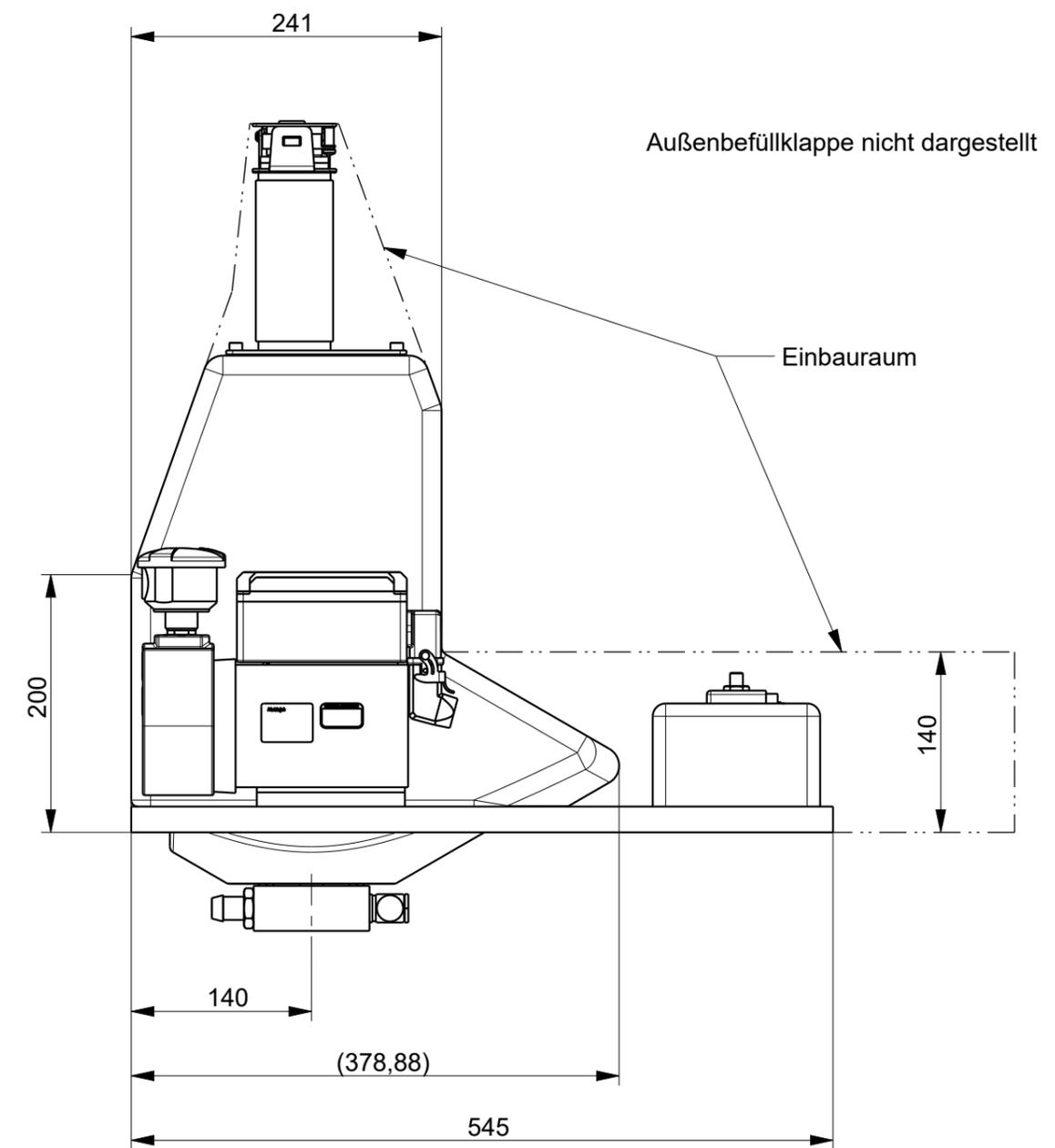
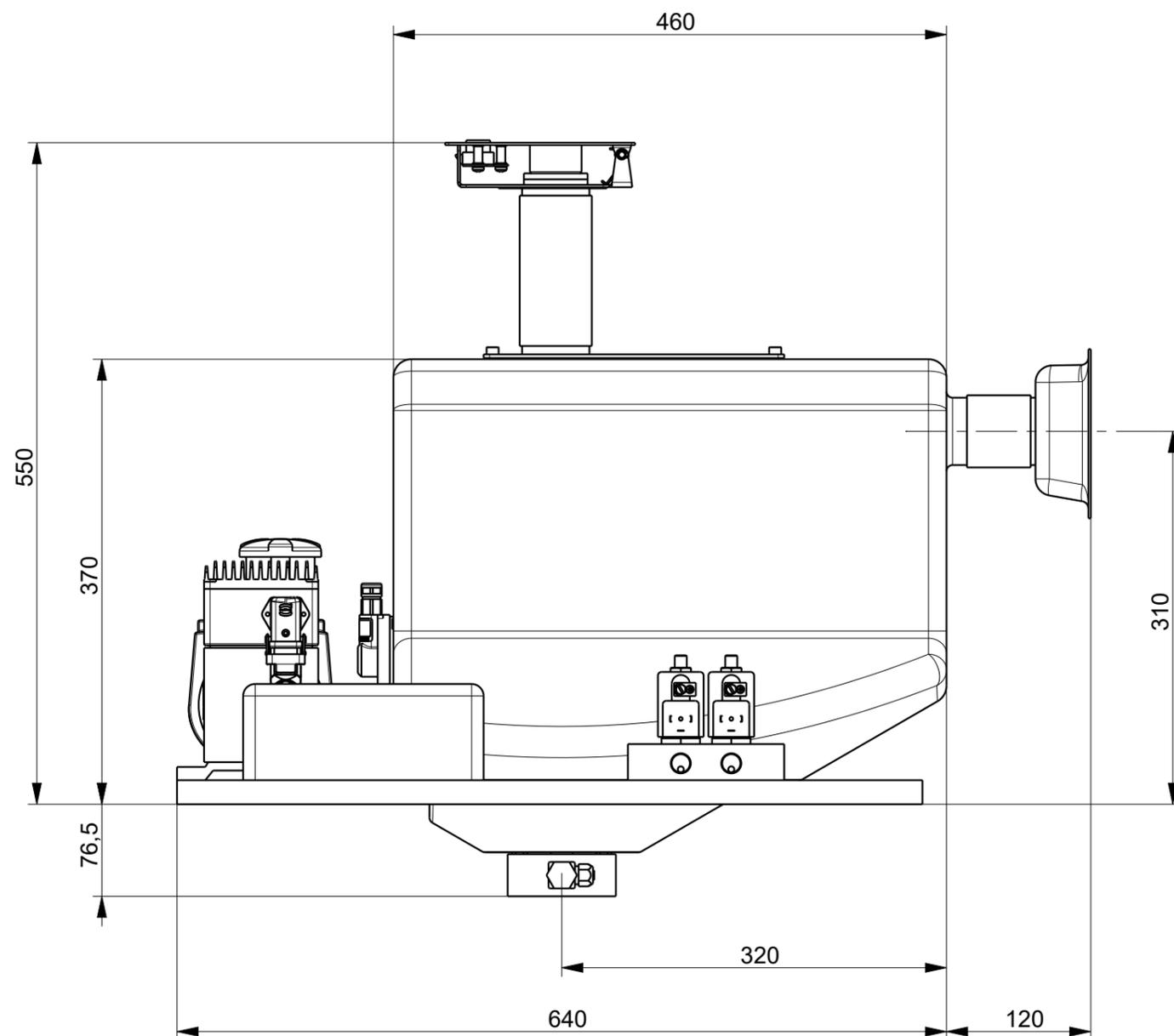
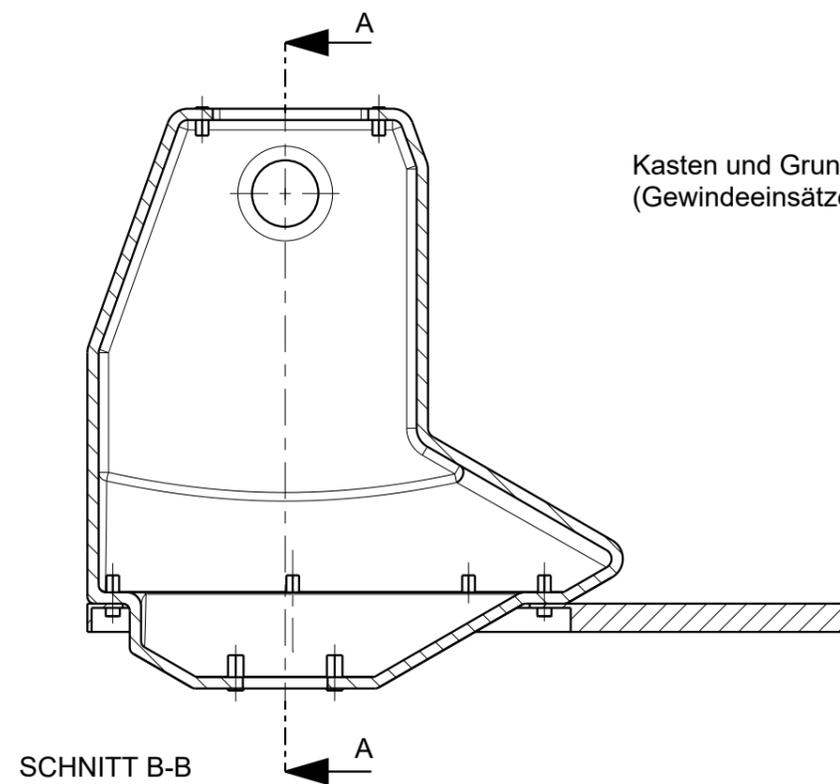
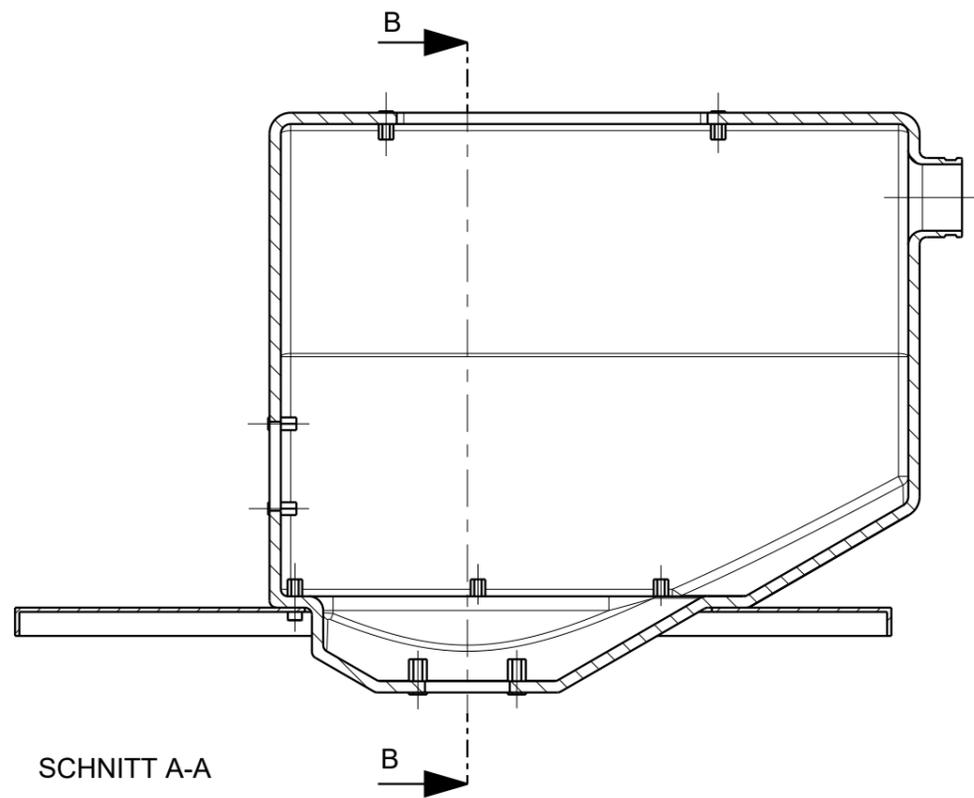


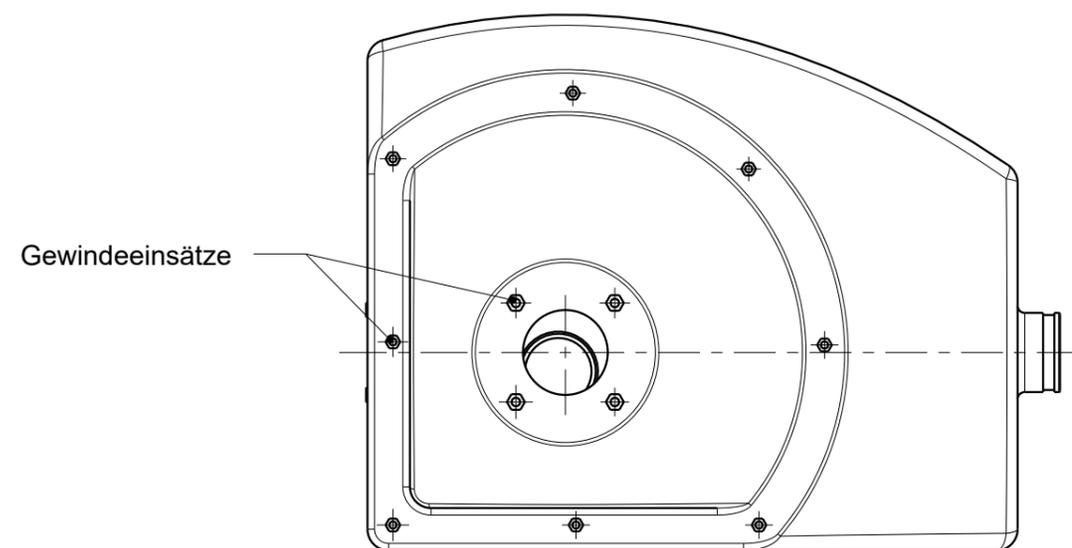
Abbildung 55: Projekt Straßenbahn, Rotationskonstruktion 3D-Schnitt



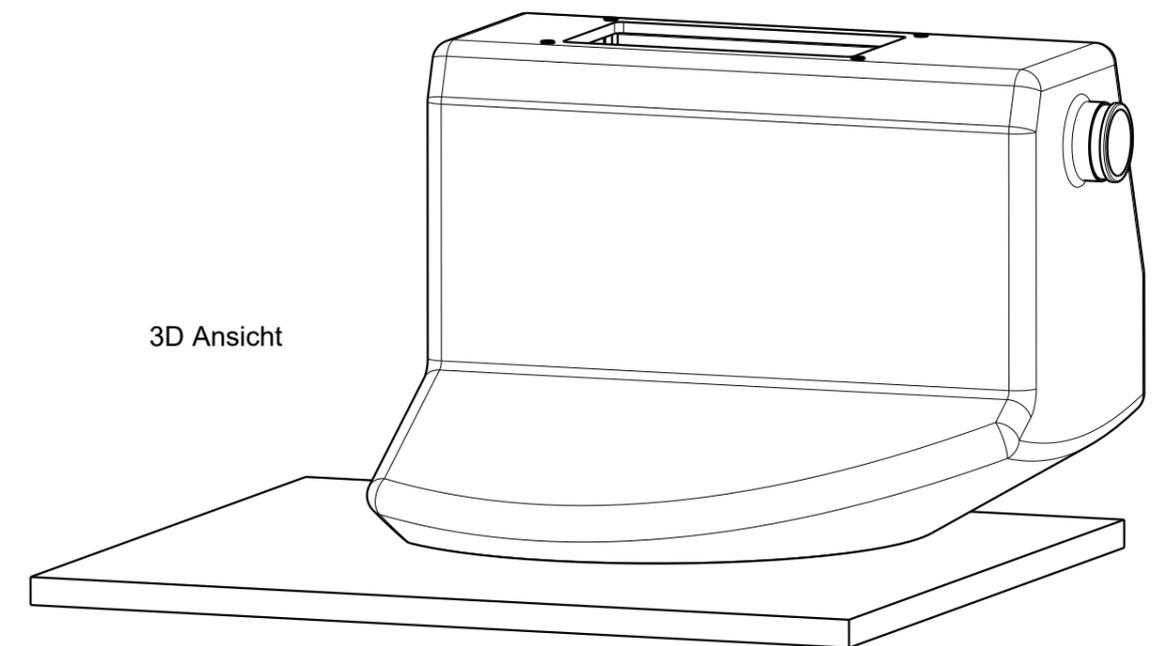
Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	Projekt Straßenbahn	Matr.nr.:	0126058
	<b>1:5</b>	Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
		TU Wien	Abbildung 56 Blatt 1 von 1
		Abgabedatum:	2015



Kasten und Grundplatte verschraubt  
(Gewindeeinsätze in Kasten einrotiert)



Kasten von unten ohne Grundplatte



Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	Projekt Straßenbahn, Rotationskonstruktion	Matr.nr.:	0126058
<b>1:5</b>	<b>Kasten mit Grundplatte</b>	Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
	TU Wien	Abgabedatum:	2015
	Abbildung 57	Blatt 1 von 1	

## 6.3 Faserverstärkte Kunststoffe

In diesem Abschnitt werden die Konzepte vorgestellt, bei denen die Sandbehälter aus faserverstärktem Kunststoff hergestellt werden. Nach den Ausführungen in Kapitel 5.6 kommen dabei verschiedene Fertigungsverfahren in Frage, nämlich das Handlaminieren und das RTM-Verfahren. Um die technische Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit dieser Verfahren hinsichtlich der Fertigung von Sandbehältern zu überprüfen, wurde an die Firma GFK Center GmbH eine Anfrage gestellt. Die Tabelle 12 zeigt eine Übersicht über das Unternehmen:

Kontakt:	Technik:	Leistungen:
GFK Center GmbH Carl-Auer-von-Welsbach- Strasse 10 4614 Marchtrenk www.gfkcenter.com	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Handlaminieren (kleine Serien)</li> <li>• RTM (mittlere Serien)</li> <li>• SMC (große Serien)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3D-CAD-Konstruktion</li> <li>• FEM-Analyse</li> <li>• Modell- und Formenbau</li> </ul>
Branchen:	Produkte:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fahrzeugbau</li> <li>• Rennsport</li> <li>• Luftfahrt</li> <li>• Schienenfahrzeugbau</li> <li>• Maschinenindustrie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gehäuse</li> <li>• Verkleidungen, Abdeckungen</li> <li>• Dachkonstruktionen</li> <li>• Kinderrutschen</li> <li>• Ruderboote, Kajaks</li> </ul>	

Tabelle 12: Übersicht GFK Center GmbH

Quelle: [www.gfkcenter.com](http://www.gfkcenter.com)

Diese Firma bietet also sowohl Handlaminieren als auch RTM als Produktionsverfahren an und ermöglicht somit einen guten Vergleich und eine Beurteilung, welches der beiden Verfahren für die Herstellung von Sandkästen besser geeignet ist. Es wurde die gleiche Anfrage gestellt wie an die Firma Promens in Kapitel 6.2. Bei den üblichen Stückzahlen bei der Produktion von Sandungssystemen wird die Fertigung im Handlaminierverfahren vorgeschlagen. Dazu werden ein Positivmodell, welches aus Schaum gefräst wird, und mehrere Arbeitsformen, welche aus GFK hergestellt werden, benötigt. Mit einer Form können etwa 200-300 Stück gefertigt werden, dabei ist die Abformung einmal täglich möglich. Die Anwendung des RTM-Verfahrens kommt erst ab einer Stückzahl von etwa 4.000 in Frage.

### 6.3.1 Schnellbahnprojekt

Für das Schnellbahnprojekt wurde von der Firma GFK Center ein konkretes Angebot vorgelegt. Es werden unterschiedlich aufwändige Ausführungen angeboten, wodurch der Stückpreis wesentlich beeinflusst wird. Alle Ausführungen sind Handlamine mit glatten und in

Wunschfarbe eingefärbten Sichtflächen. Außerdem werden zwei unterschiedliche Varianten in Betracht gezogen, nämlich:

- Variante 1: Die gesamte „Sitzkiste“ inkl. Trichter wird aus GFK gefertigt. Dabei wird der Trichter mit dem restlichen Kasten verklebt.
- Variante 2: Nur der Trichter wird aus GFK gefertigt und mit einem Kasten aus Metall verklebt.

Die folgende Tabelle fasst das Angebot der Firma GFK Center zusammen:

	Variante 1	Variante 2	Anmerkungen/Ausführung
<b>Kosten für Modell:</b>	4.100 €	1.150 €	einmalig
<b>Kosten für Arbeitsform:</b>	2.500 €	560 €	eine Form für ca. 200-300 Stück
<b>Kosten für Metallkasten<sup>1</sup>:</b>	---	215,78 €	Stückkosten für Kasten aus Metall ohne Trichter
<b>Produktions- (P) und Gesamtkosten (G) je Stück:</b>	P: 627 € G: <b>641 €</b>	P: 165 € G: <b>409 €</b>	Wandstärke 5 mm, Brandbeständigkeitsklasse 1
	P: 495 € G: <b>509 €</b>	P: 130 € G: <b>374 €</b>	Wandstärke 4 mm, Brandbeständigkeitsklasse 1
	P: 328 € G: <b>342 €</b>	P: 86 € G: <b>330 €</b>	Wandstärke 4 mm, Brandbeständigkeitsklasse 2

Tabelle 13: Angebot der Firma GFK Center

Die Tabelle 13 zeigt, dass der Stückpreis sehr stark von der gewählten Werkstoffkombination und der Wandstärke abhängig ist. Der Anteil der Modell- und Werkzeugkosten an den Gesamtkosten pro Stück ist dafür gering. Bei einer Produktion von z.B. 1.000 Stück betragen diese 14,10 € für Variante 1 und 3,39 € für Variante 2 (Verwendung von 4 Arbeitsformen).

Bei Betrachtung der Variante 1 ist ersichtlich, dass die günstigste angebotene Ausführung im gleichen Größenbereich wie die Schweißkonstruktion liegt. Die Gesamtkosten je Einheit betragen bei einer Produktion von 1.000 Stück 342,10 € (vgl. Schweißkonstruktion: 307,98 €). Bei den Ausführungen in Brandbeständigkeitsklasse 1 liegen die Kosten jedoch deutlich darüber und diese kommen daher nicht in Frage.

Zur Beurteilung der Variante 2 wurde zunächst eine Berechnung der Metallkonstruktion analog zu Kap 6.1.1 durchgeführt. Die Kosten des geschweißten Kastens ohne Trichter belaufen sich demnach auf 215,78 €. Die Gesamtkosten des Trichters aus GFK in der günstigsten Ausführung betragen bei einer Produktion von 1.000 Stück 89,39 € pro Stück. Dazu kommen noch die Kosten für das Verkleben des Trichters mit dem Metallgehäuse von ca. 25 € (Annahme: 1 Stunde, 25 €/Stunde). Das ergibt einen Gesamtbetrag von 330,17 € je Einheit für die Variante 2 in Brandbeständigkeitsklasse 2.

<sup>1</sup> Berechnung analog zu Kapitel 6.1.1

Somit liegen die Kosten für die günstigste angebotene Ausführung bei beiden Varianten in der gleichen Größenordnung wie die der geschweißten Behälter. Da bei der Herstellung der Sandkästen im Rotationsverfahren deutlich niedrigere Kosten erzielt werden können (siehe Kapitel 6.2), werden keine weiteren Überlegungen und Untersuchungen angestellt, ob die Ausführung in Brandbeständigkeitsklasse 2 mit einer Wandstärke von 4 mm den Anforderungen an Sandkästen entspricht.

Die folgenden Abbildungen zeigen die GFK-Konstruktion in Variante 1. Die gesamte Konstruktion ist aus GFK gefertigt und besteht aus drei Grundkomponenten (siehe Abbildung 58):

- Kasten
- Trichter
- Rahmen für Einfüllklappe

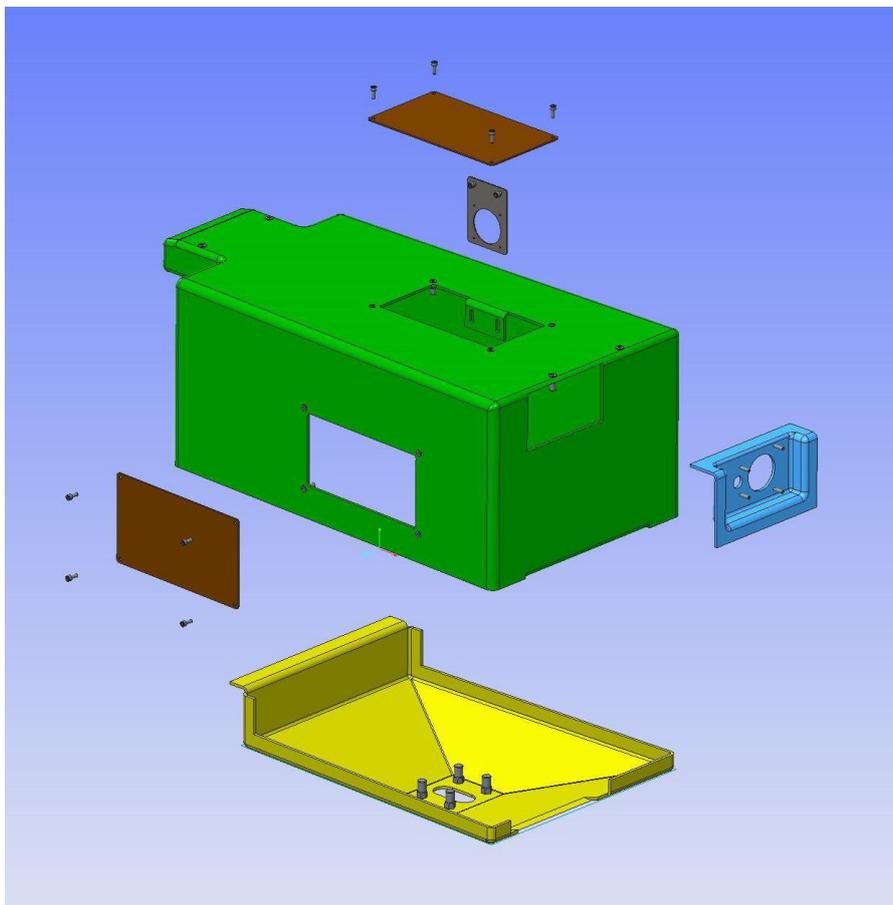


Abbildung 58: Projekt Schnellbahn, GFK-Konstruktion, Einzelteile

Diese drei Teile werden miteinander verklebt und bilden so den Sandkasten, der wieder als Sitzkiste ausgeführt wird. Die Revisionsdeckel, die Sandungsanlage und die Sitze werden wie bei der Schweißkonstruktion mit Blindnietmuttern befestigt. Zur Anbringung der Einfüllklappe werden Einpressbolzen verwendet. Die Sandstandsanzeige wird auf einer eigenen Platte montiert.

In Abbildung 58 sind die Einzelteile der GFK-Konstruktion dargestellt. Die Abbildung 59 zeigt eine aufgeschnittene Darstellung der Konstruktion samt den Komponenten Sandungsanlage, Sandstandsanzeige und Einfüllklappe. In Abbildung 60 ist die Konstruktion mit den Außenabmessungen dargestellt. Die Abbildung 61 zeigt die drei Grundkomponenten in Schnittdarstellung.

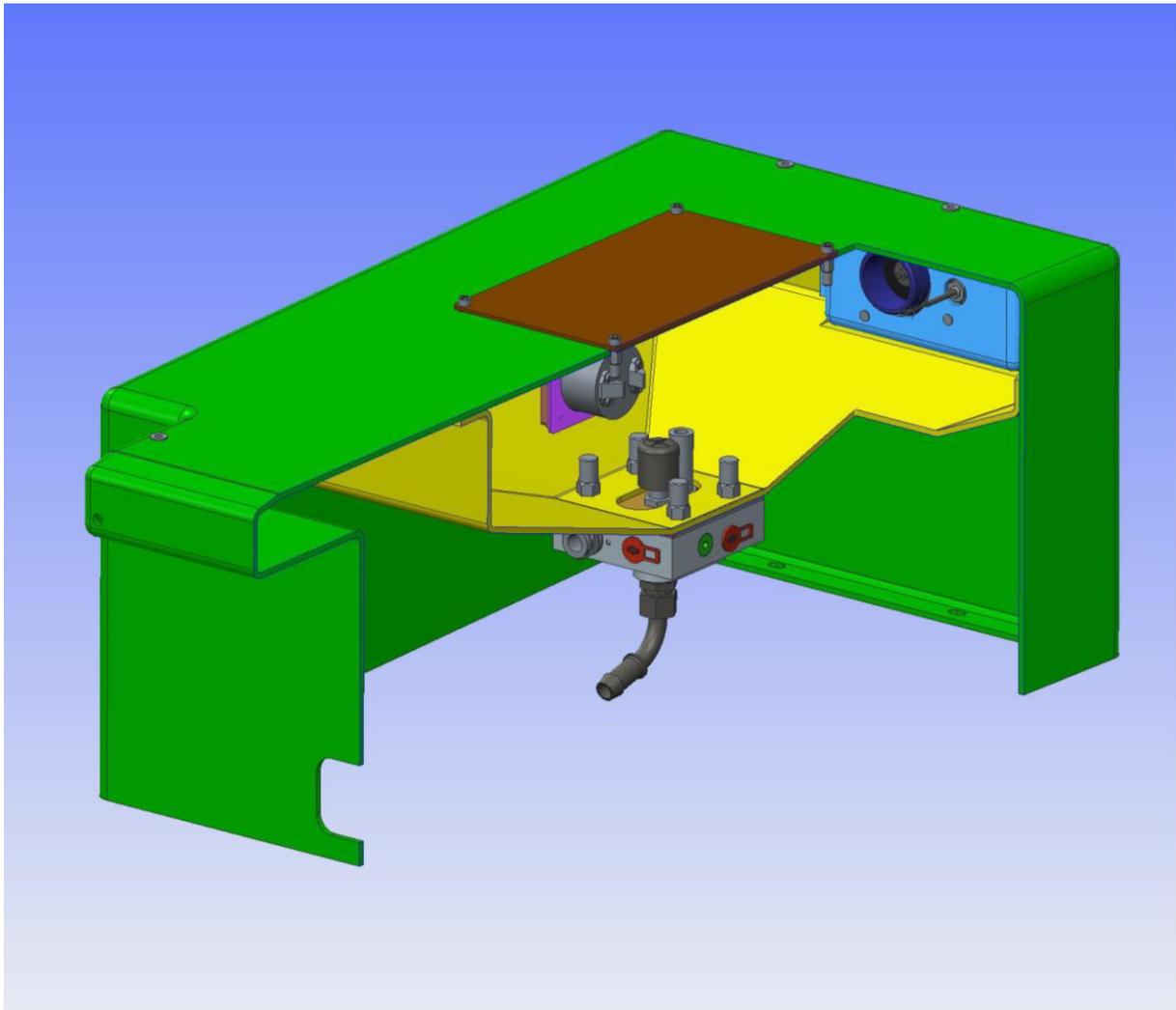
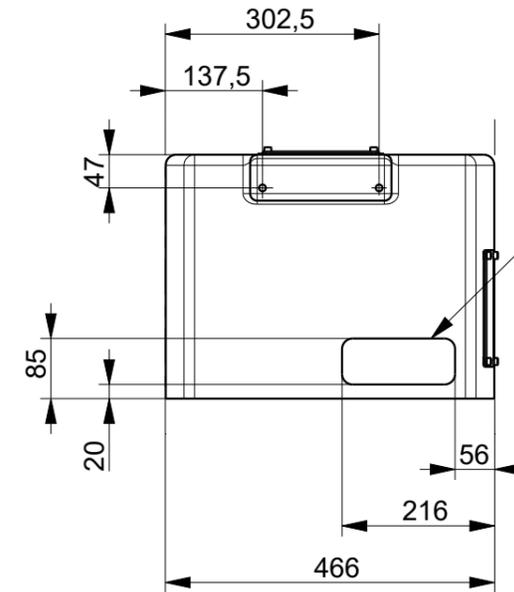
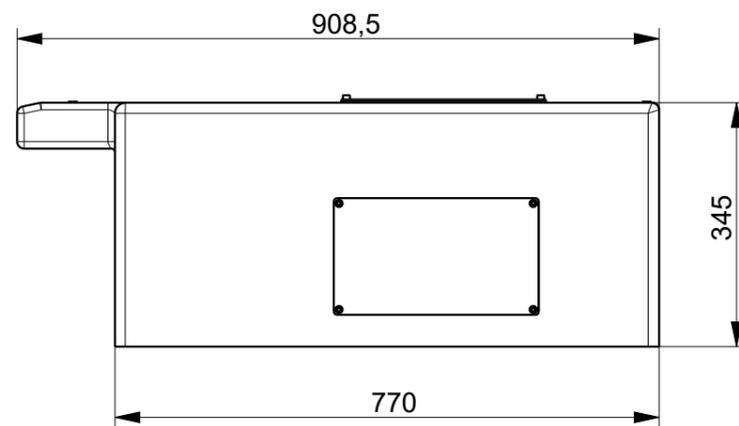
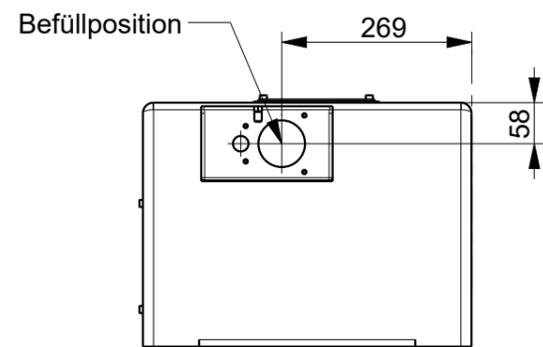
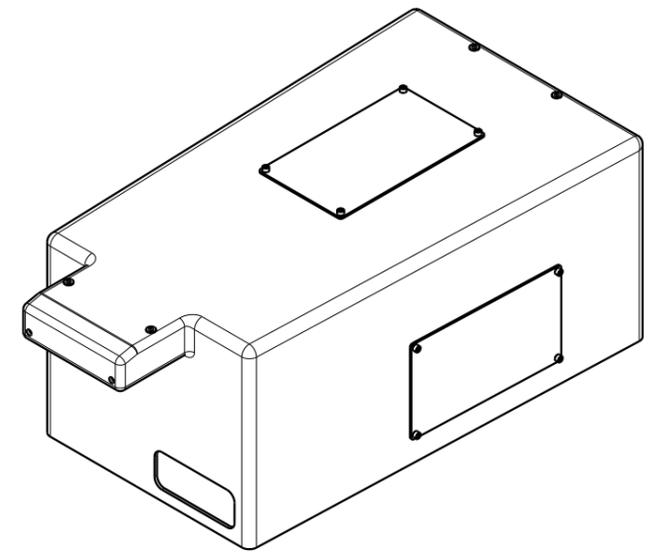
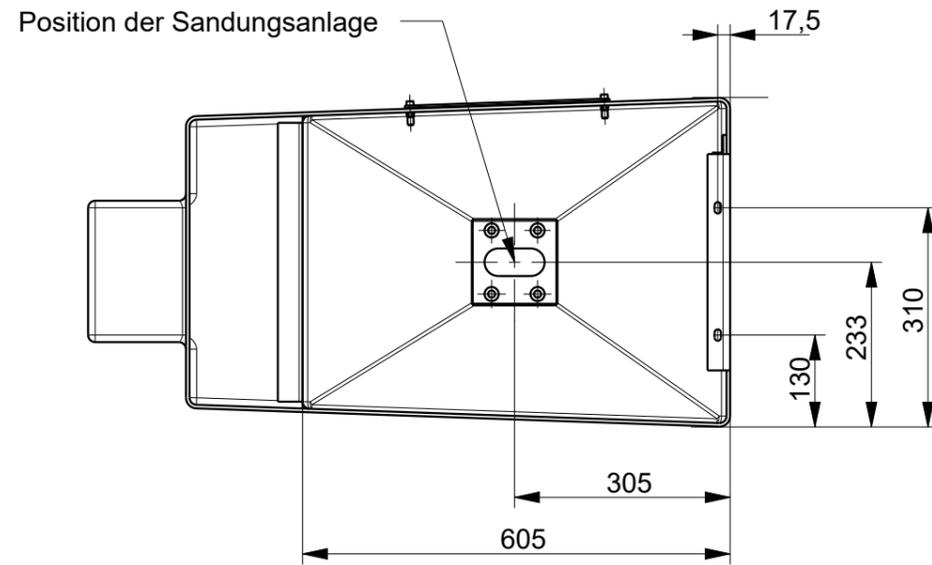
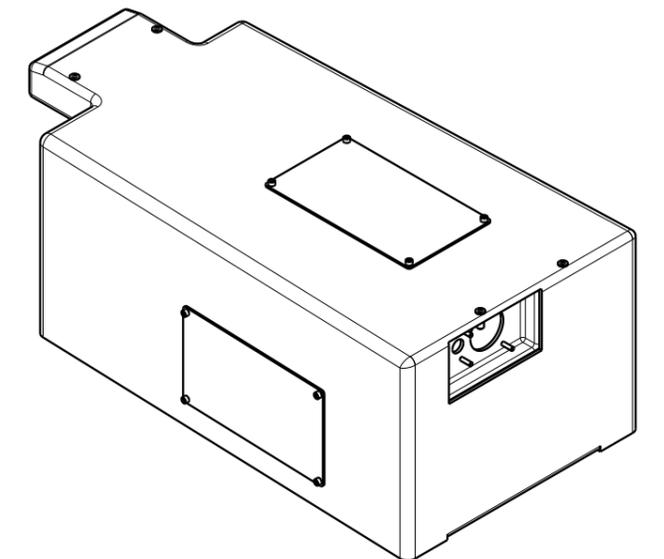
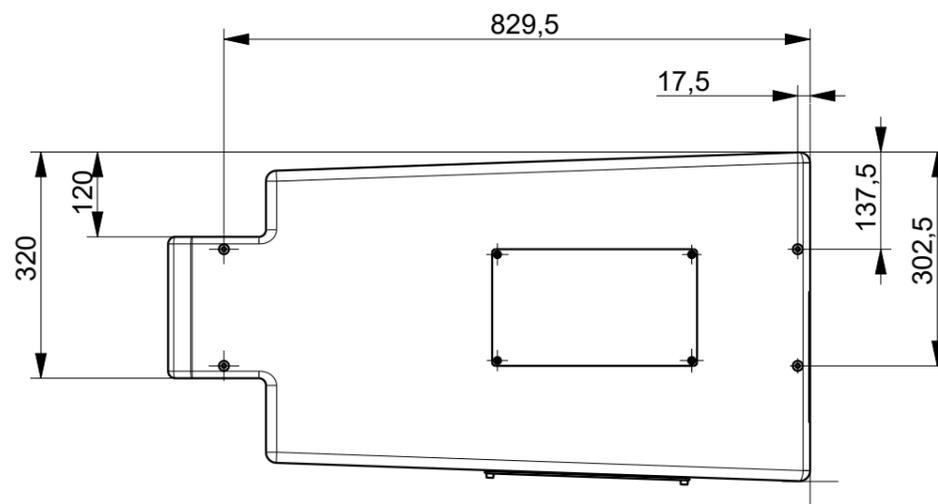


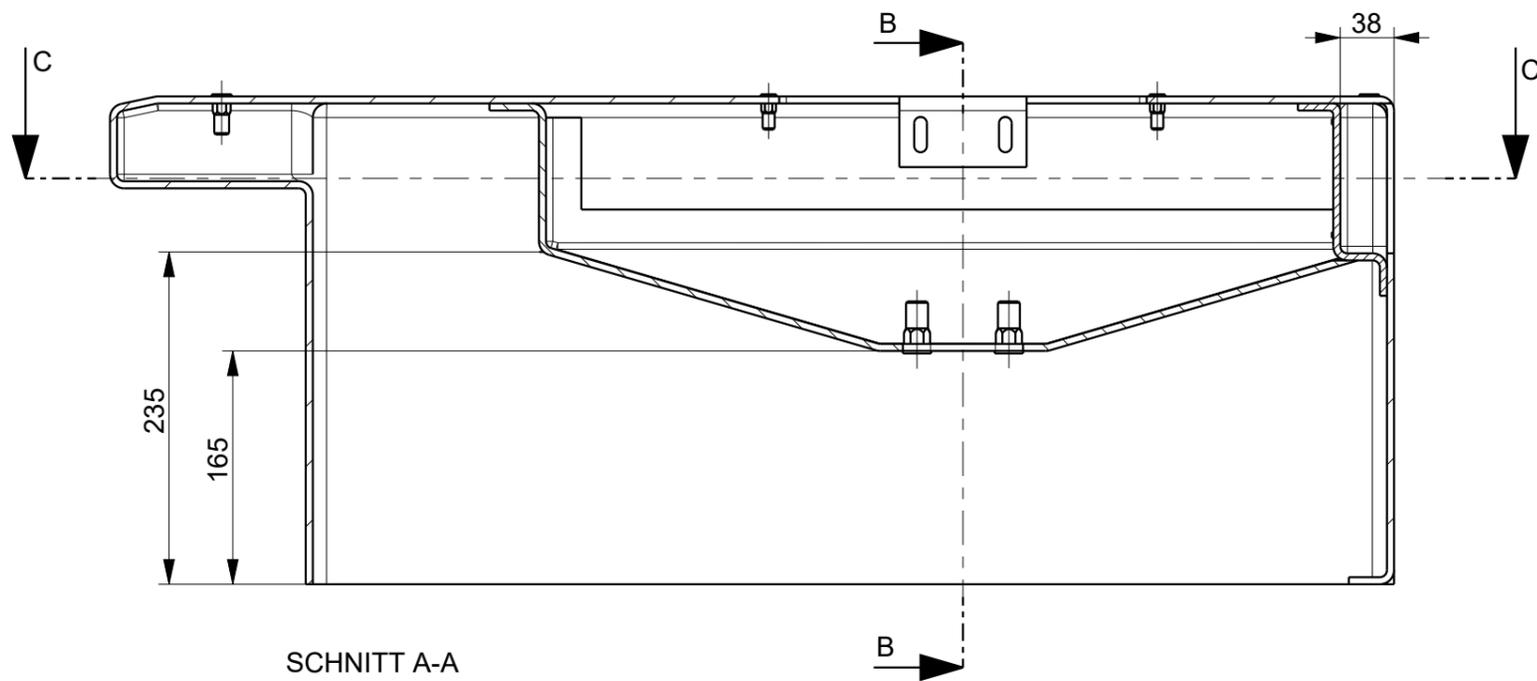
Abbildung 59: Projekt Schnellbahn, GFK-Konstruktion 3D-Schnitt



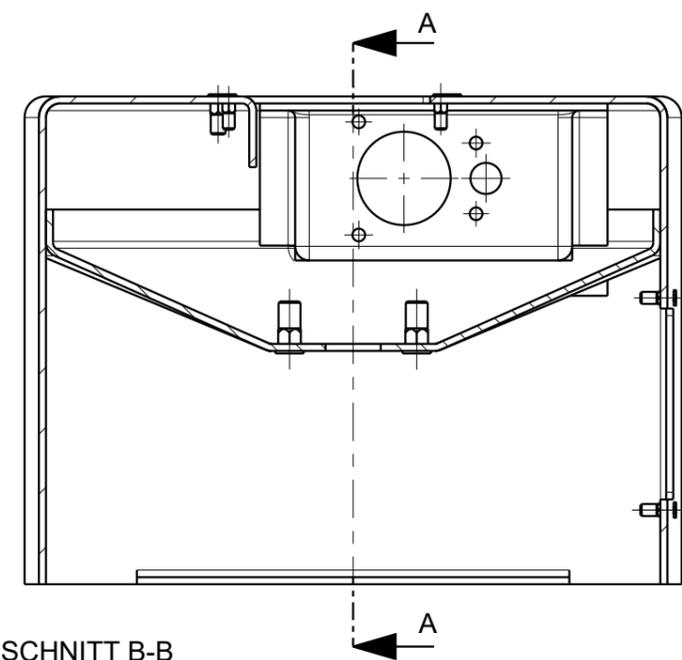
Öffnung für Sandschlauch und Druckluftversorgung



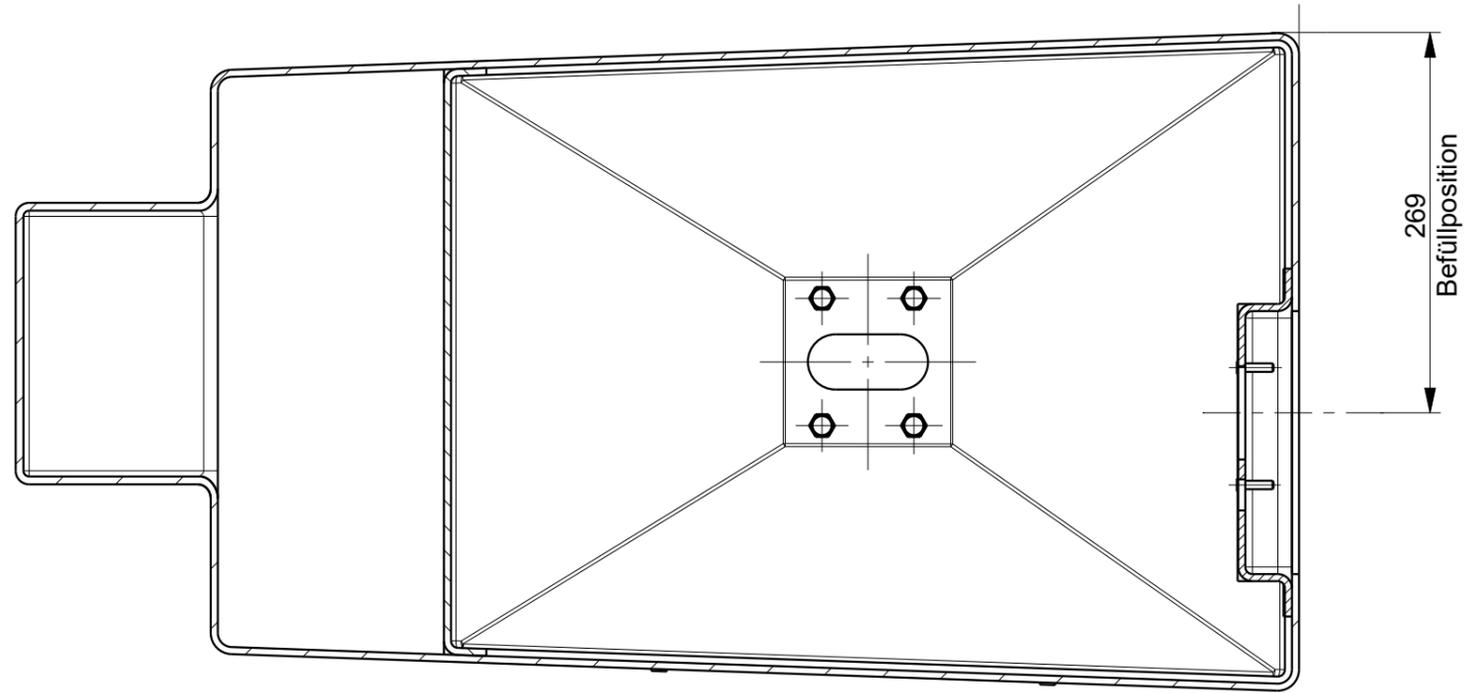
Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	Projekt Schnellbahn	Matr.nr.:	0126058
	<b>1:10</b>	Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
	TU Wien	Abbildung 60	Blatt 1 von 1
		Abgabedatum:	2015



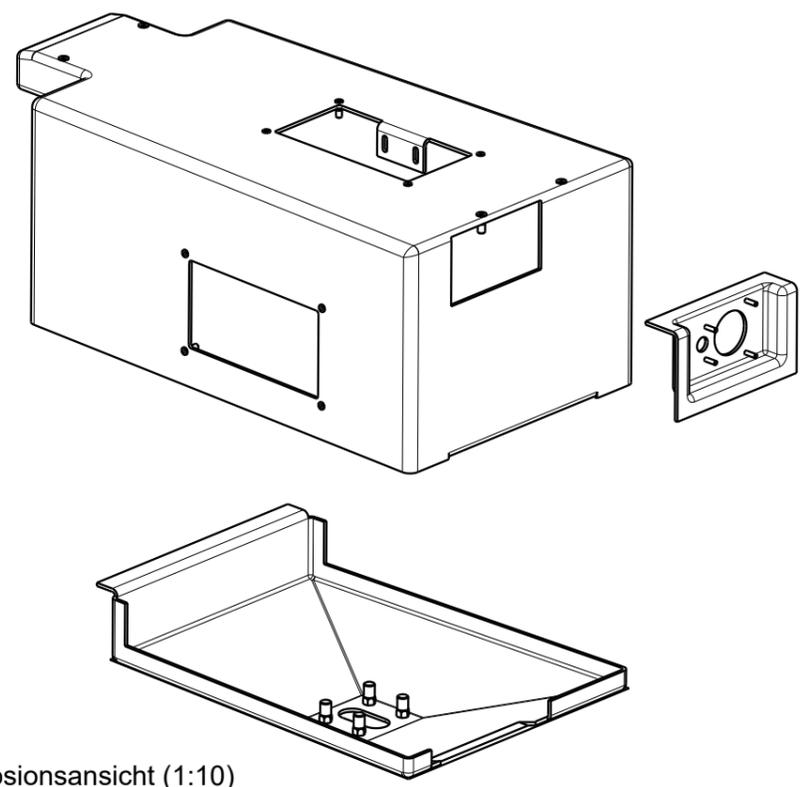
SCHNITT A-A



SCHNITT B-B



SCHNITT C-C



Explosionsansicht (1:10)

Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:  1:5	Projekt Schnellbahn, GFK-Konstruktion	Matr.nr.:	0126058
	<b>Kasten mit Trichter und Rahmen für Einfüllklappe</b>	Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
	TU Wien	Abbildung 61	Blatt 1 von 1
		Abgabedatum:	2015

### 6.3.2 Straßenbahnprojekt

Für das Straßenbahnprojekt liegt kein konkretes Angebot vor, es sind die gleichen Größenordnungen zu erwarten wie beim Schnellbahnprojekt. Im Folgenden werden zwei verschiedene Varianten vorgestellt und die Vor- und Nachteile der Konstruktionen erläutert:

- Die Variante 1 besteht aus Ober- und Unterteil. Die Grundplatte ist im Unterteil integriert. Beide Teile werden aus GFK gefertigt, siehe Abbildung 62.
- Die Variante 2 besteht aus Grundplatte, Ober- und Unterteil. Die Grundplatte ist ähnlich der Grundplatte der Schweiß- und Rotationskonstruktionen und kann aus Metall oder GFK gefertigt werden. Ober- und Unterteil werden aus GFK gefertigt, siehe Abbildung 66.

Die Variante 1 ist aus zwei Grundkomponenten aufgebaut: Unterteil und Oberteil (siehe Abbildung 62). Die Grundplatte und der untere Teil des Trichters bilden den Unterteil. Der Oberteil stellt den Hauptteil des Sandkastens dar. Ober- und Unterteil werden miteinander verklebt, zur Befestigung des Revisionsdeckels und der weiteren Komponenten werden Blindnietmutter verwendet.

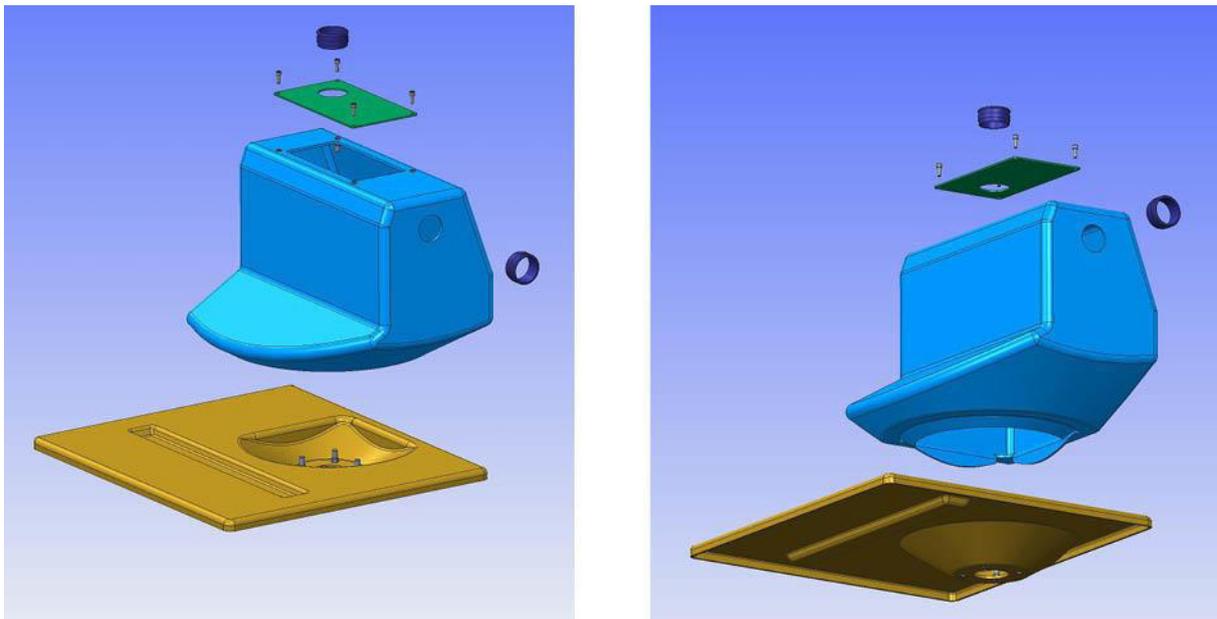


Abbildung 62: Projekt Straßenbahn, GFK-Konstruktion Var.1, Einzelteile

Vorteile von Variante 1:

- nur 2 Teile
- einfache Verbindung der Teile

Nachteil:

- schwierige Fertigung des Oberteils

Hohlkörper können im Handlaminierverfahren nicht als ein Teil hergestellt werden. Die maximale Weite der Öffnung des Oberteils misst ca. 269 mm (siehe Abbildung 65). Bei Verwendung einer Positivform muss die Form in mehrere Teile zerlegt werden, um sie aus dem fertigen Bauteil entformen zu können. Eine Negativform muss 2-teilig ausgeführt sein und man muss händisch durch die Öffnung arbeiten. Es ist also entweder ein aufwändiges mehrteiliges Werkzeug notwendig oder die Fertigung gestaltet sich handwerklich schwierig.

Die Abbildung 63 zeigt eine aufgeschnittene Darstellung der Konstruktion samt den Komponenten Sandungsanlage, Sandstandsanzeige, Innen- und Außenbefüllung, Verdichter und elektrische Anschlussleiste. Die Magnetventile sind in dieser Ansicht weggeschnitten. In Abbildung 64 ist die Konstruktion mit allen Komponenten und den Außenabmessungen dargestellt. Die Abbildung 65 zeigt Ober- und Unterteil in Schnittdarstellung. Die notwendigen Ausformschrägen werden in den Abbildungen nicht dargestellt, da sie vom gewählten Werkzeugaufbau und der Werkzeuggtrennung abhängig sind.

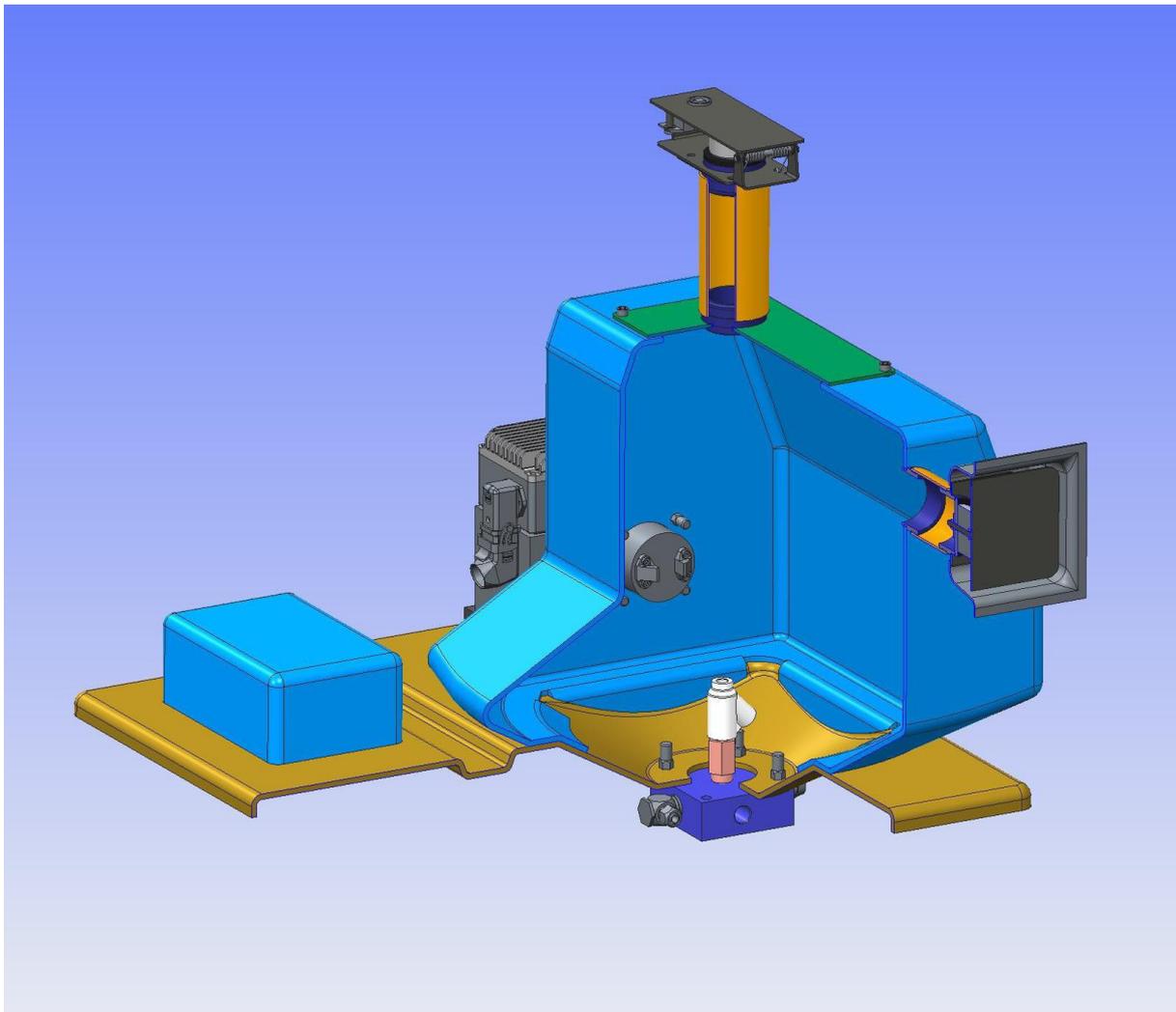
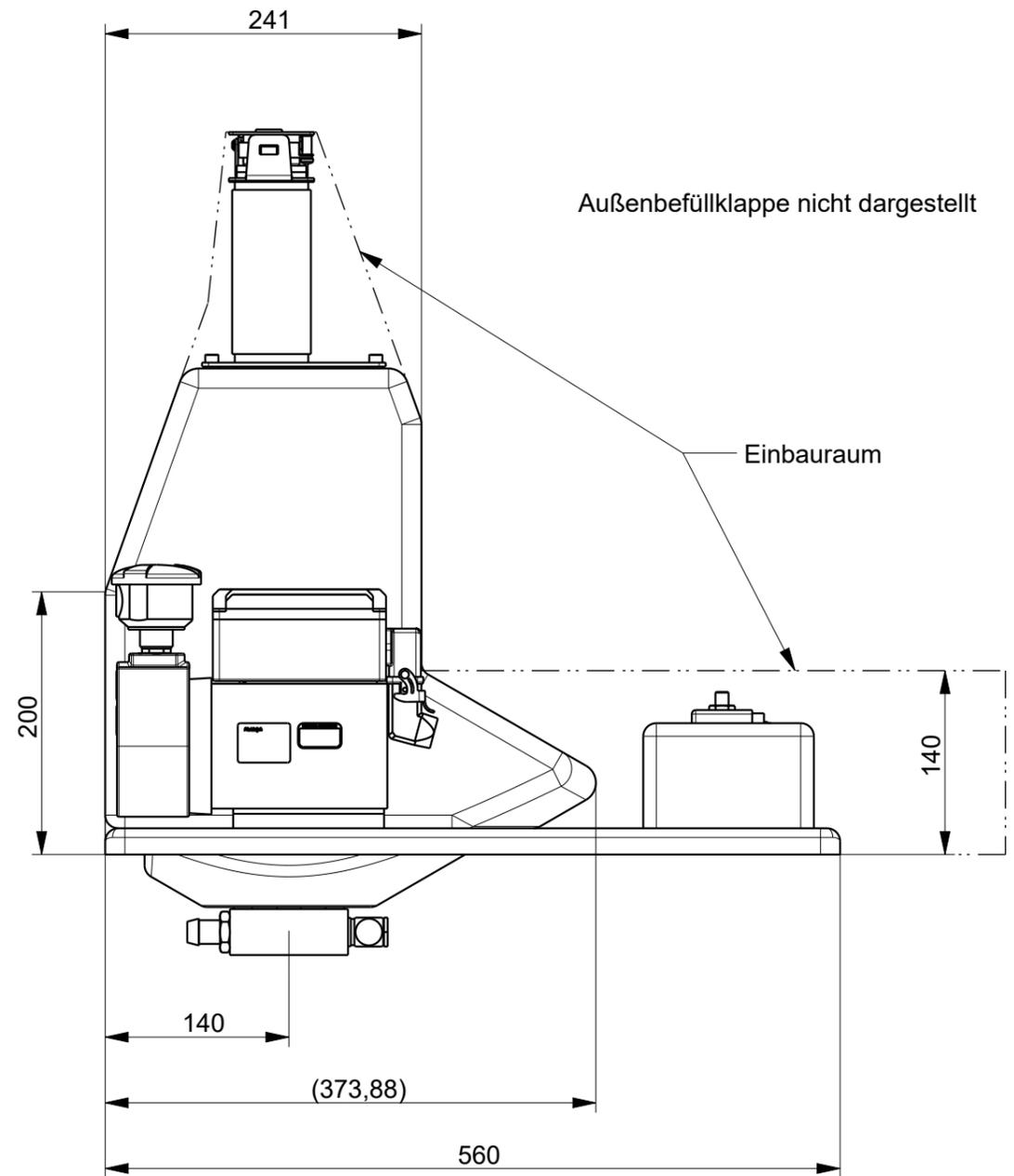
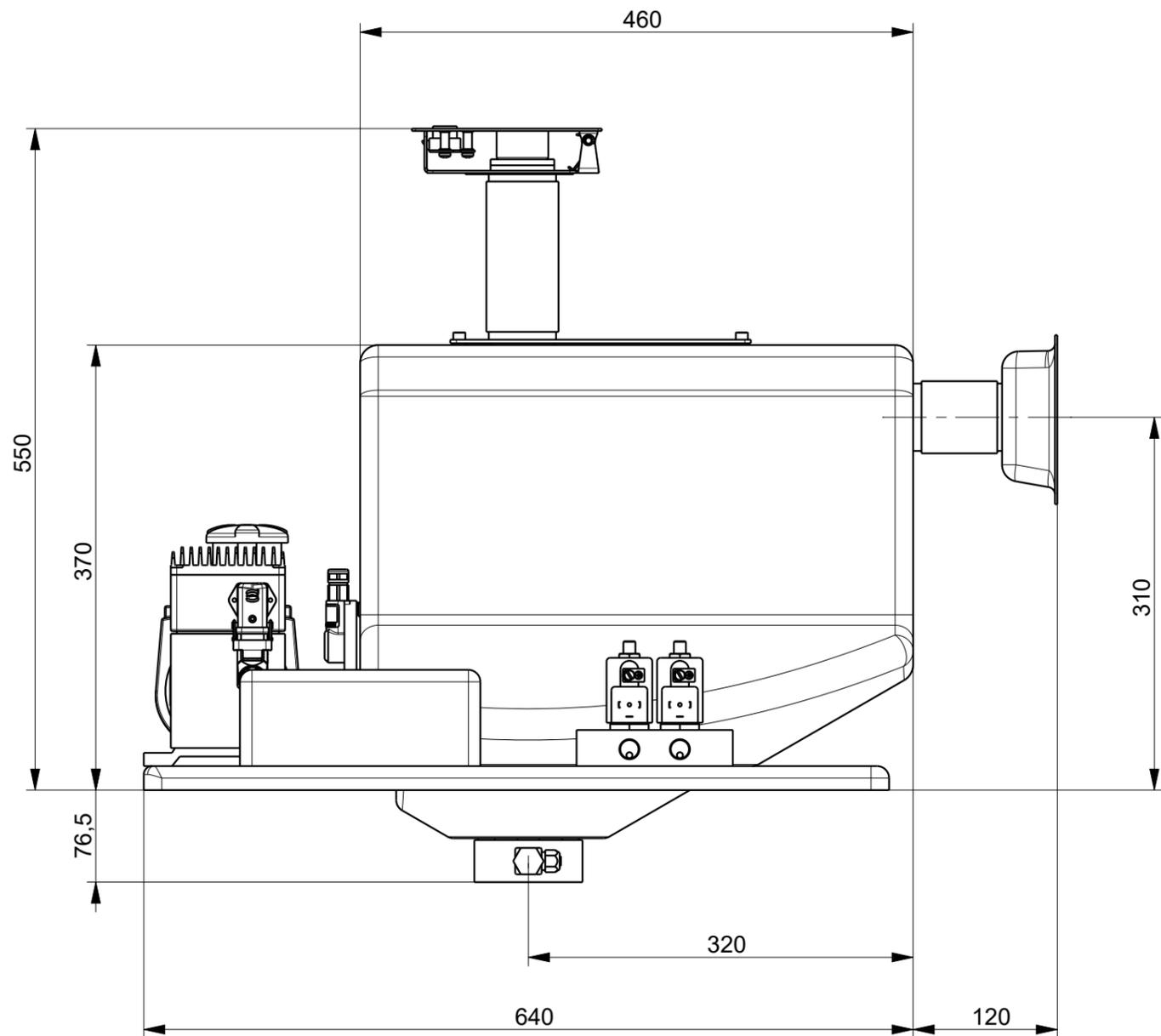
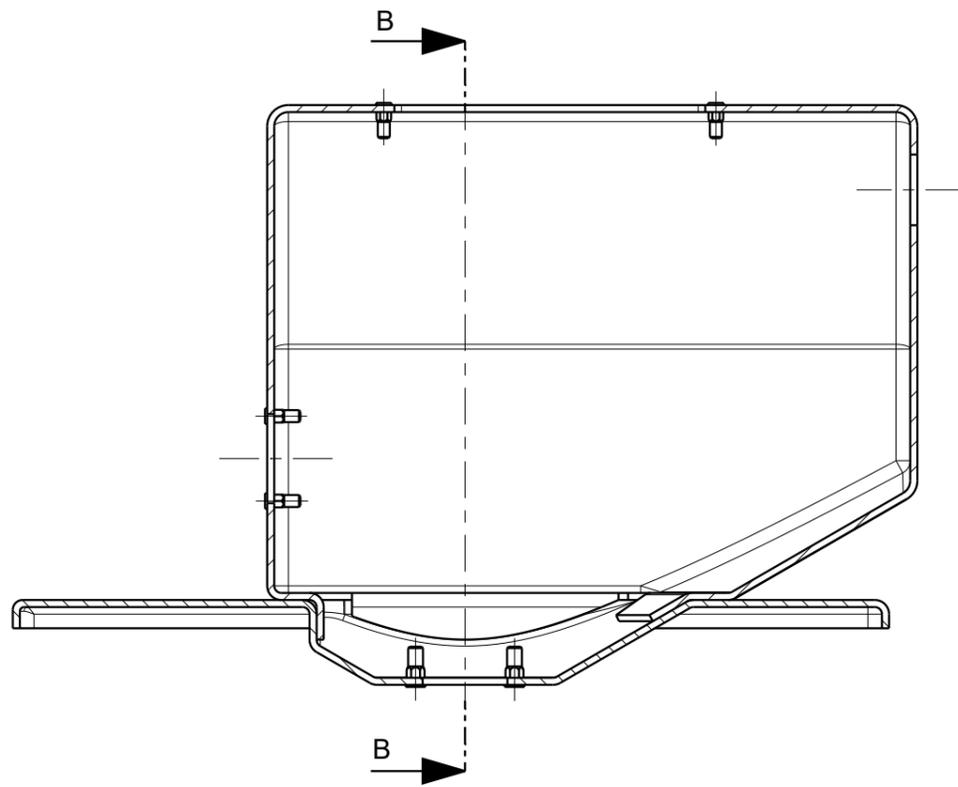


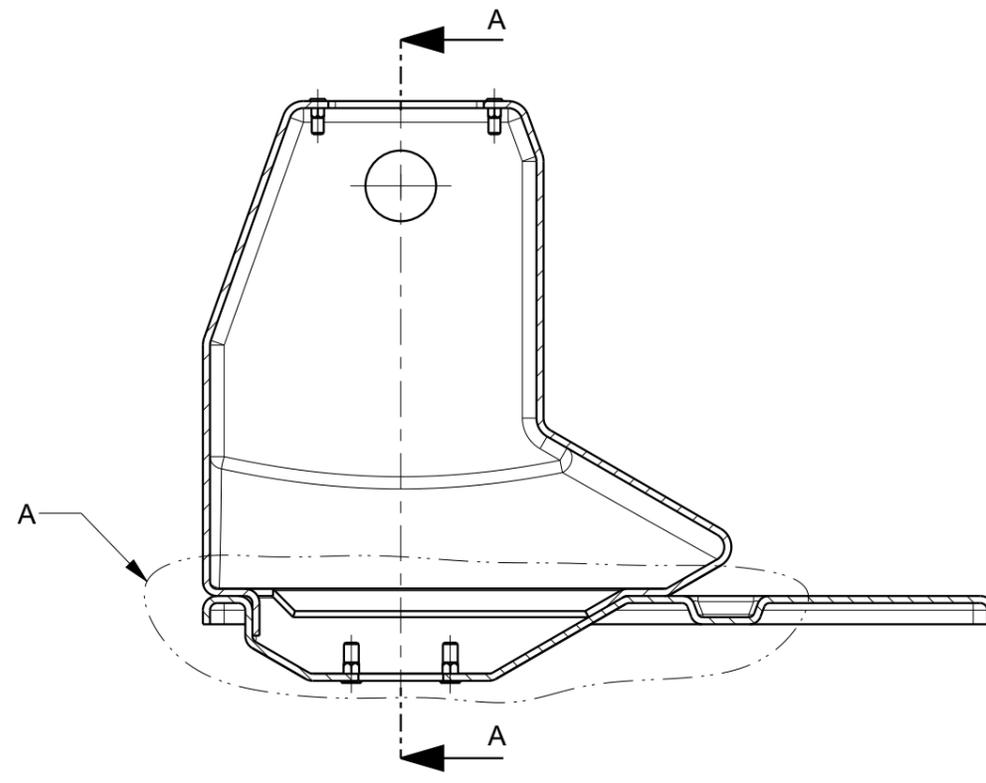
Abbildung 63: Projekt Straßenbahn, GFK-Konstruktion Var.1 3D-Schnitt



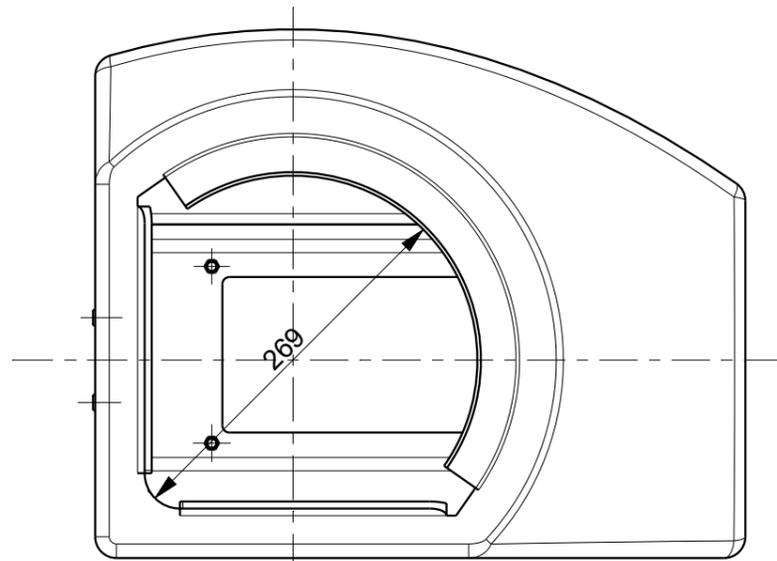
Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	Projekt Straßenbahn	Matr.nr.:	0126058
	<b>1:5</b>	Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
	TU Wien	Abbildung 64	Blatt 1 von 1
		Abgabedatum:	2015



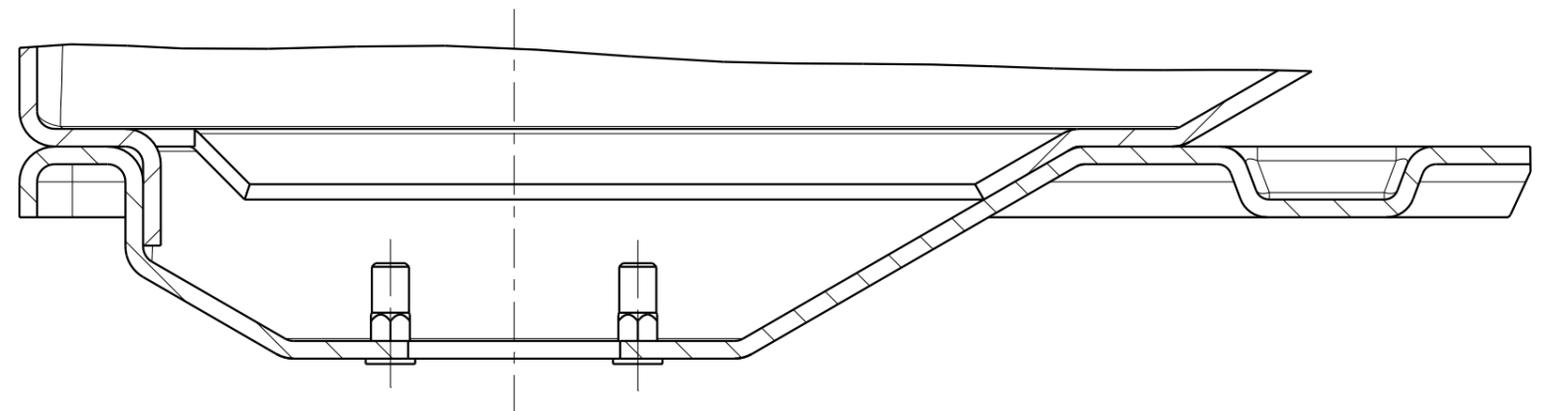
SCHNITT A-A



SCHNITT B-B



Oberteil von unten



A (1:2)

Ober- und Unterteil verklebt  
 Ausformschrägen nicht dargestellt  
 (abhängig von Werkzeugaufbau und -teilung)

Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	Projekt Straßenbahn, GFK-Konstruktion Var. 1	Matr.nr.:	0126058
	<b>Ober- und Unterteil</b>	Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
	<b>1:5</b>	Abgabedatum:	2015
	TU Wien	Abbildung 65	Blatt 1 von 1

Die Variante 2 besteht aus Grundplatte, Ober- und Unterteil (siehe Abbildung 66). Die Grundplatte kann aus Metall oder GFK gefertigt werden und ist ähnlich aufgebaut wie die Grundplatte der Schweiß- und Rotationskonstruktionen. Ober- und Unterteil bilden den eigentlichen Sandkasten. Die drei Teile und der Anschluss für den Einfüllstutzen werden miteinander verklebt, zur Befestigung des Revisionsdeckels und der weiteren Komponenten werden Blindnietmutter verwendet.

Vorteile von Variante 2:

- Einzelteile einfach herstellbar
- keine Hinterschnitte
- einteilige Werkzeuge

Nachteile:

- 3 Einzelteile
- komplizierte Verbindung von Ober- und Unterteil

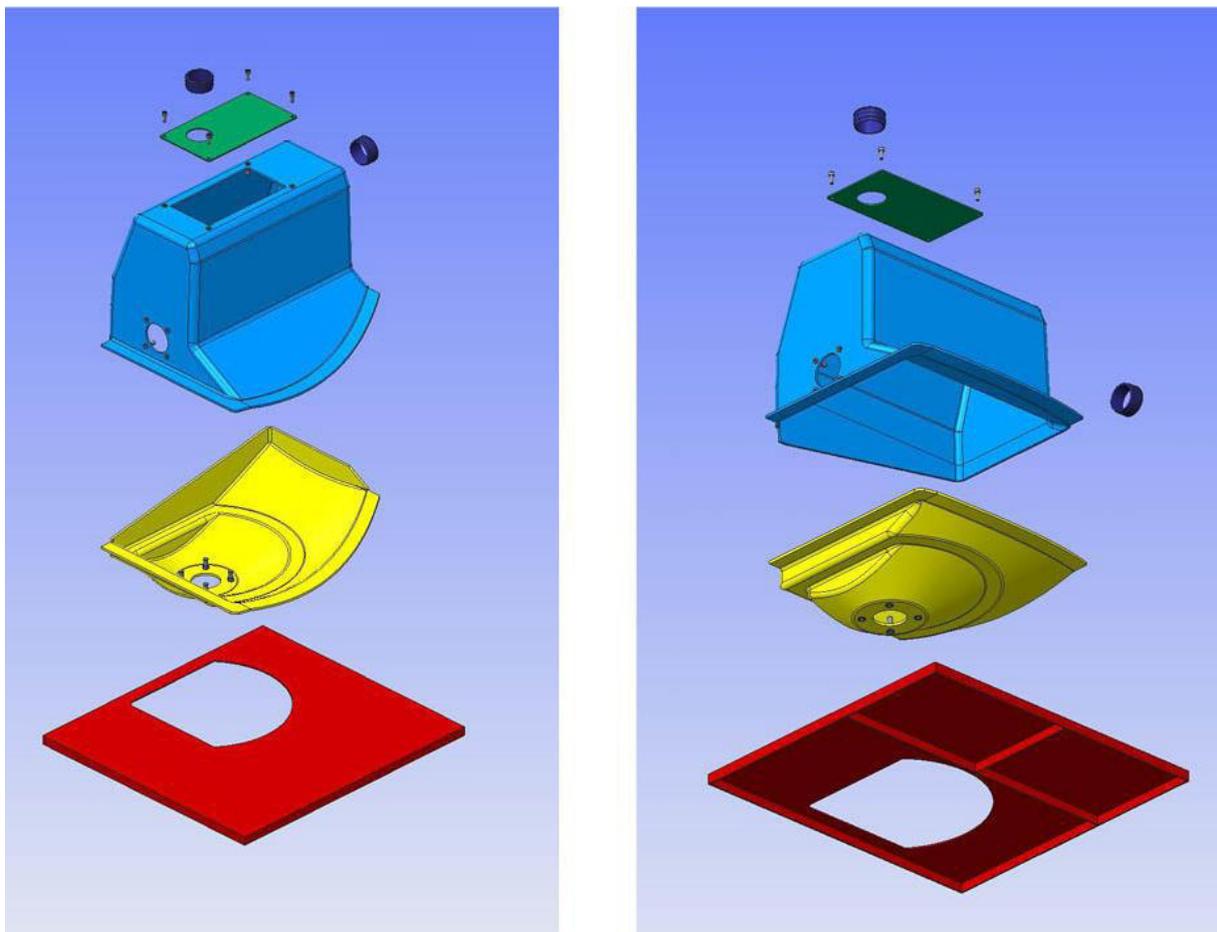


Abbildung 66: Projekt Straßenbahn, GFK-Konstruktion Var.2, Einzelteile

Die Verbindung von Grundplatte und Unterteil erfolgt so wie bei der Rotationskonstruktion, nur werden die Teile in diesem Fall verklebt und nicht verschraubt (vergleiche Abbildung 57

und Abbildung 69). Zur Verbindung von Ober- und Unterteil werden die Teile an der vorderen und linken Seite mit einem Flansch versehen. An der hinteren und rechten Seite ist das nicht möglich, da der Sandkasten die Grenzen des zur Verfügung stehenden Einbauraums voll ausnutzt. An diesen Seiten überlappen die Wände des Oberteils jene des Unterteils um etwa 30 mm, siehe Abbildung 69.

Die Abbildung 67 zeigt eine aufgeschnittene Darstellung der Konstruktion samt den Komponenten Sandungsanlage, Sandstandsanzeige, Innen- und Außenbefüllung, Verdichter und elektrische Anschlussleiste. Die Magnetventile sind in dieser Ansicht weggeschnitten. In Abbildung 68 ist die Konstruktion mit allen Komponenten und den Außenabmessungen dargestellt. Die Abbildung 69 zeigt die drei Grundkomponenten in Schnittdarstellung, wodurch die Verbindung der einzelnen Teile gut erkennbar ist.

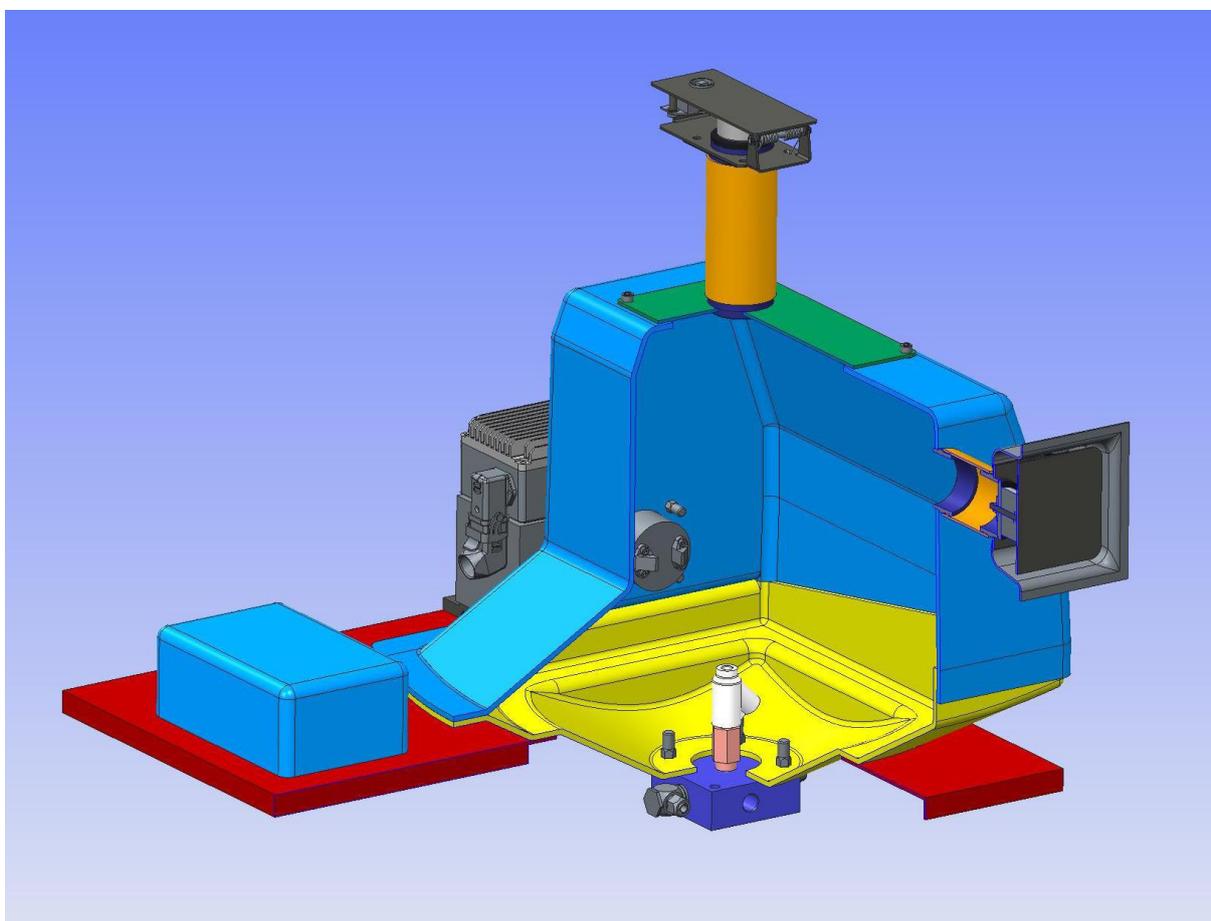
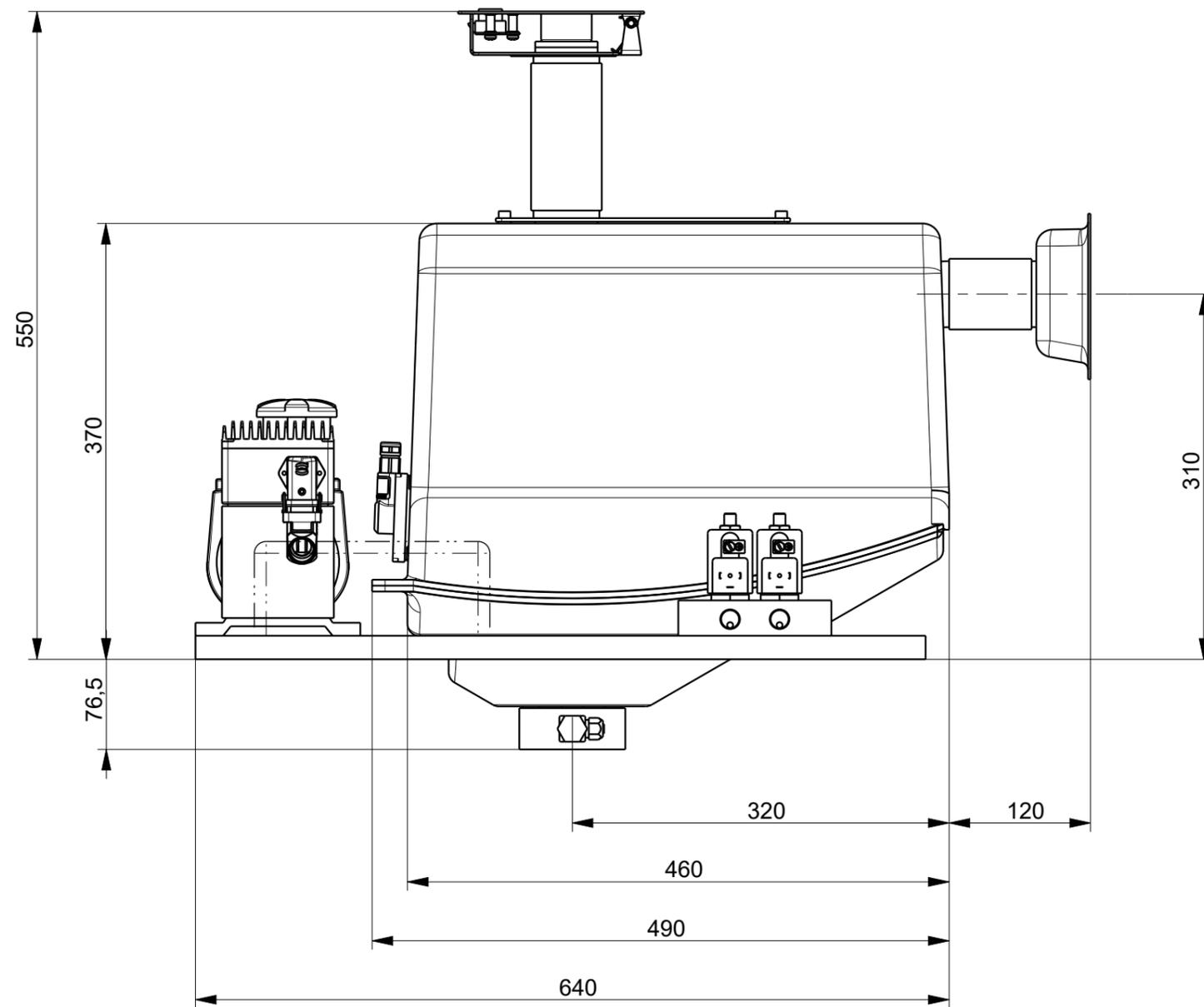
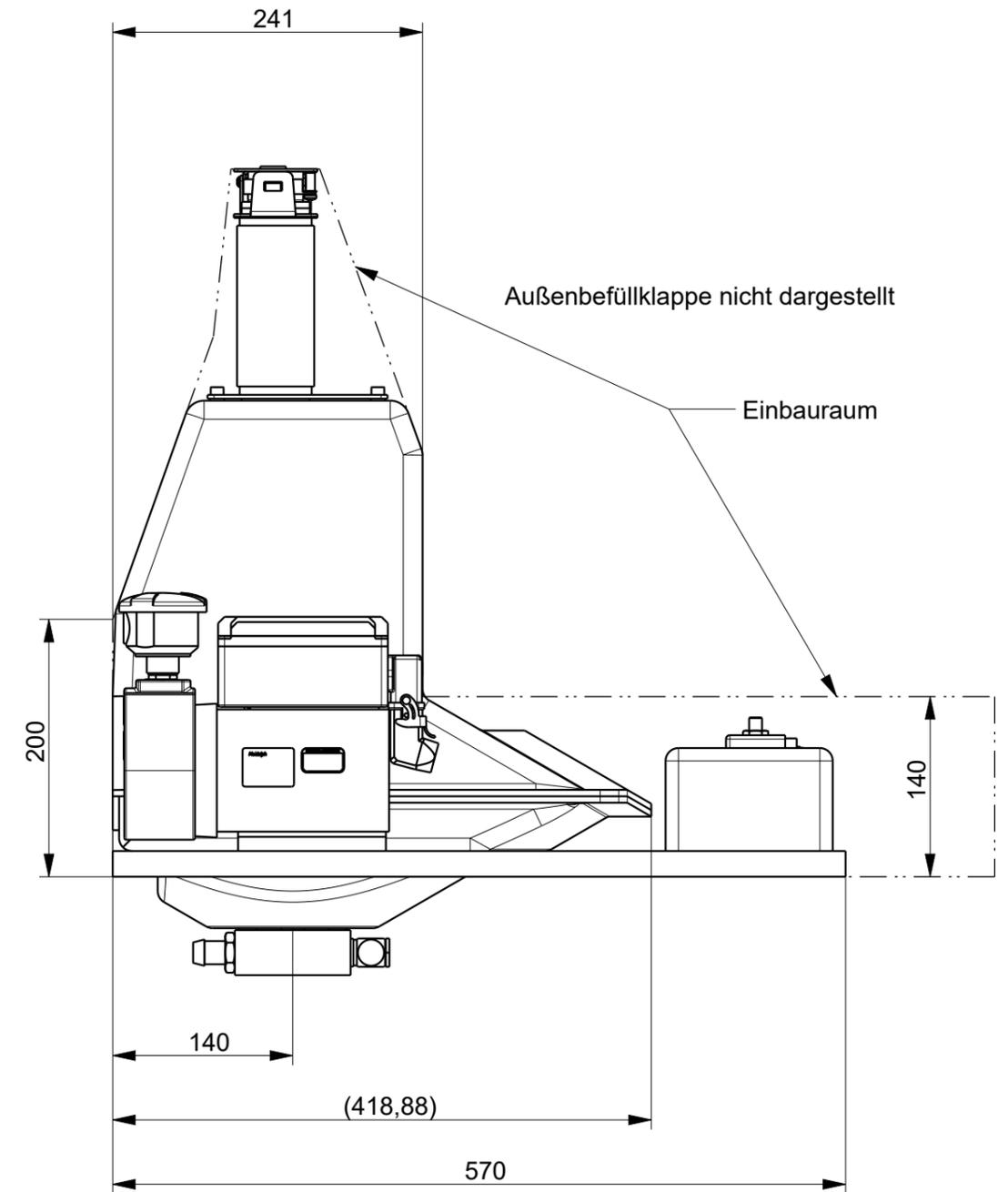


Abbildung 67: Projekt Straßenbahn, GFK-Konstruktion Var.2 3D-Schnitt

Beide Varianten haben also ihre Vor- und Nachteile. Es sind in beiden Fällen ähnliche Kosten wie bei der Schweißkonstruktion zu erwarten. Hier zeigt sich wieder der Vorteil der Rotationskonstruktion, bei der der Sandkasten als ein einziges Teil gefertigt wird und die komplizierte Verbindung der einzelnen Teile wegfällt.

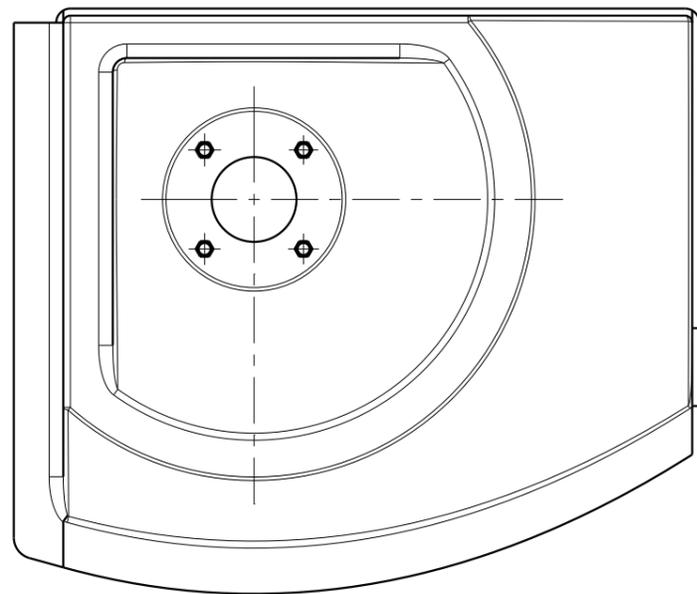
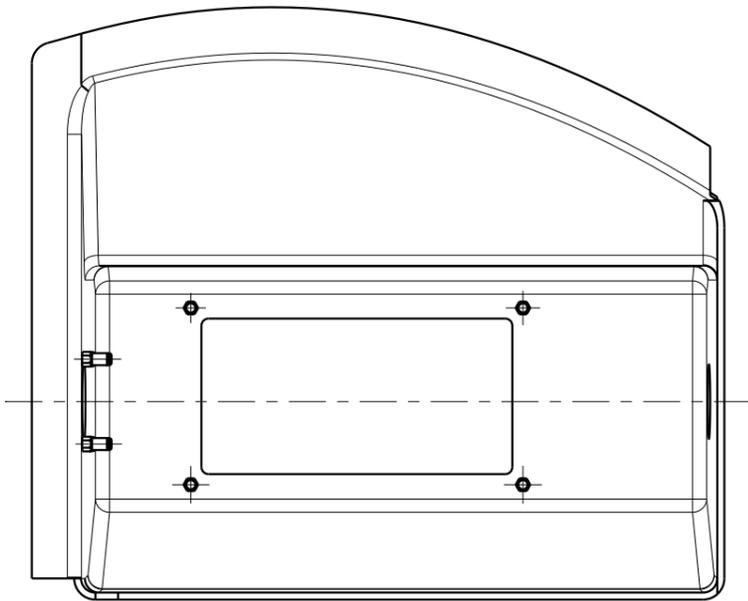


elektrische Anschlussleiste strichliert dargestellt

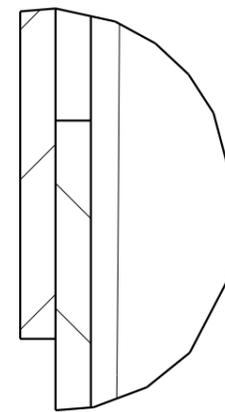
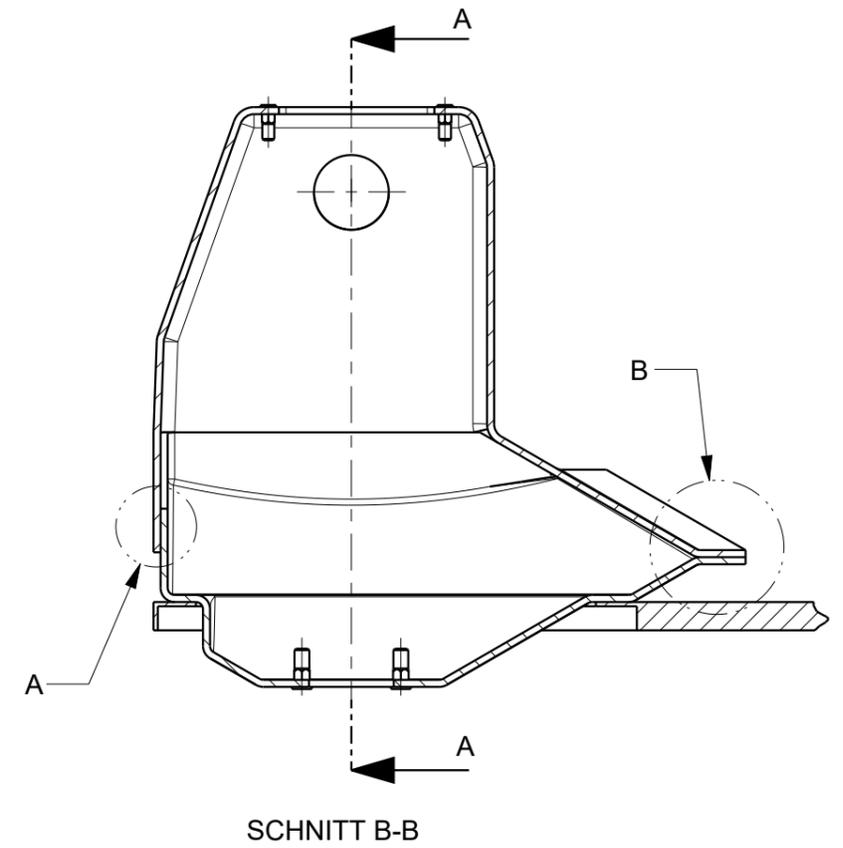
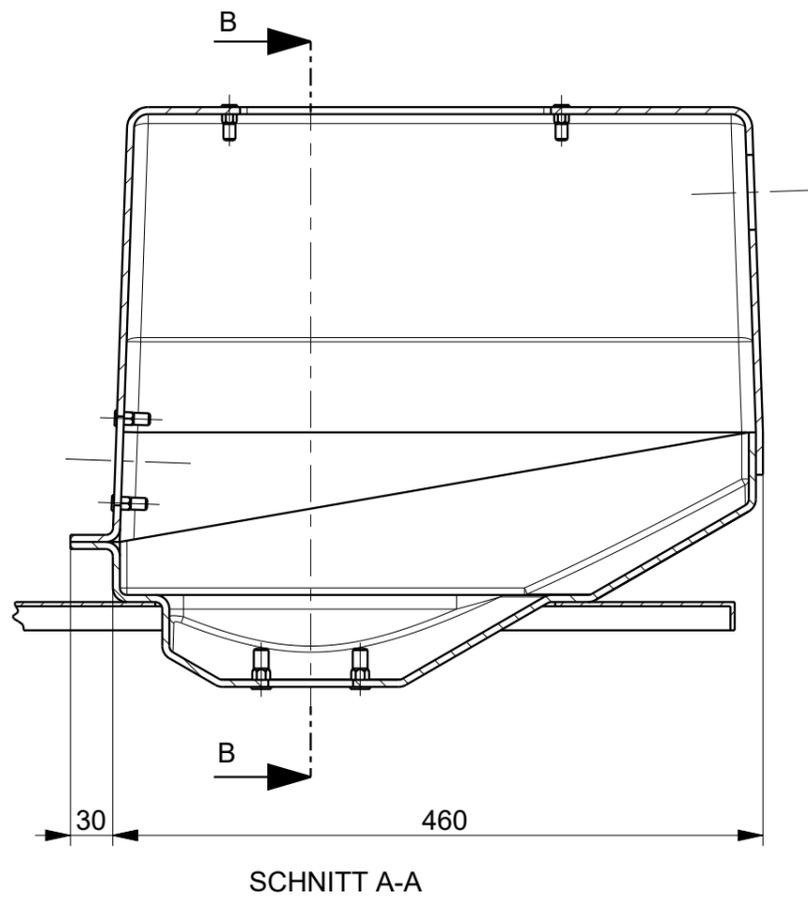


Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	Projekt Straßenbahn	Matr.nr.:	0126058
<b>1:5</b>	<b>GFK-Konstruktion Var. 2</b> mit Außenabmessungen	Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
	TU Wien	Abbildung 68	Blatt 1 von 1
		Abgabedatum:	2015

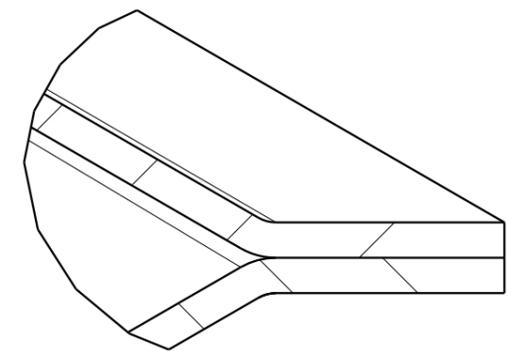
Oberteil von unten



Unterteil von oben



A (1:1)  
Überlappung



B (1:1)  
Flansch

Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	Projekt Straßenbahn, GFK-Konstruktion Var. 2	Matr.nr.:	0126058
	<b>1:5</b>	Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
		Abgabedatum:	2015
	TU Wien	Abbildung 69	Blatt 1 von 1

## 7 Fazit und Ausblick

Die Ausführungen in Kapitel 6 zeigen, dass das Rotationsformen die kostengünstigste Möglichkeit zur Herstellung von Sandkästen darstellt. Voraussetzung sind entsprechende Stückzahlen, die eine einmalige Investition in ein Produktionswerkzeug (ab ca. 20.000 €) erlauben. Bei vielen Projekten zu Sandungssystemen sind die Stückzahlen jedoch deutlich geringer, hier sind Schweißkonstruktionen aus Metall nach wie vor die beste Lösung. Die Abbildung 70 zeigt einen Kostenvergleich der beiden Verfahren.

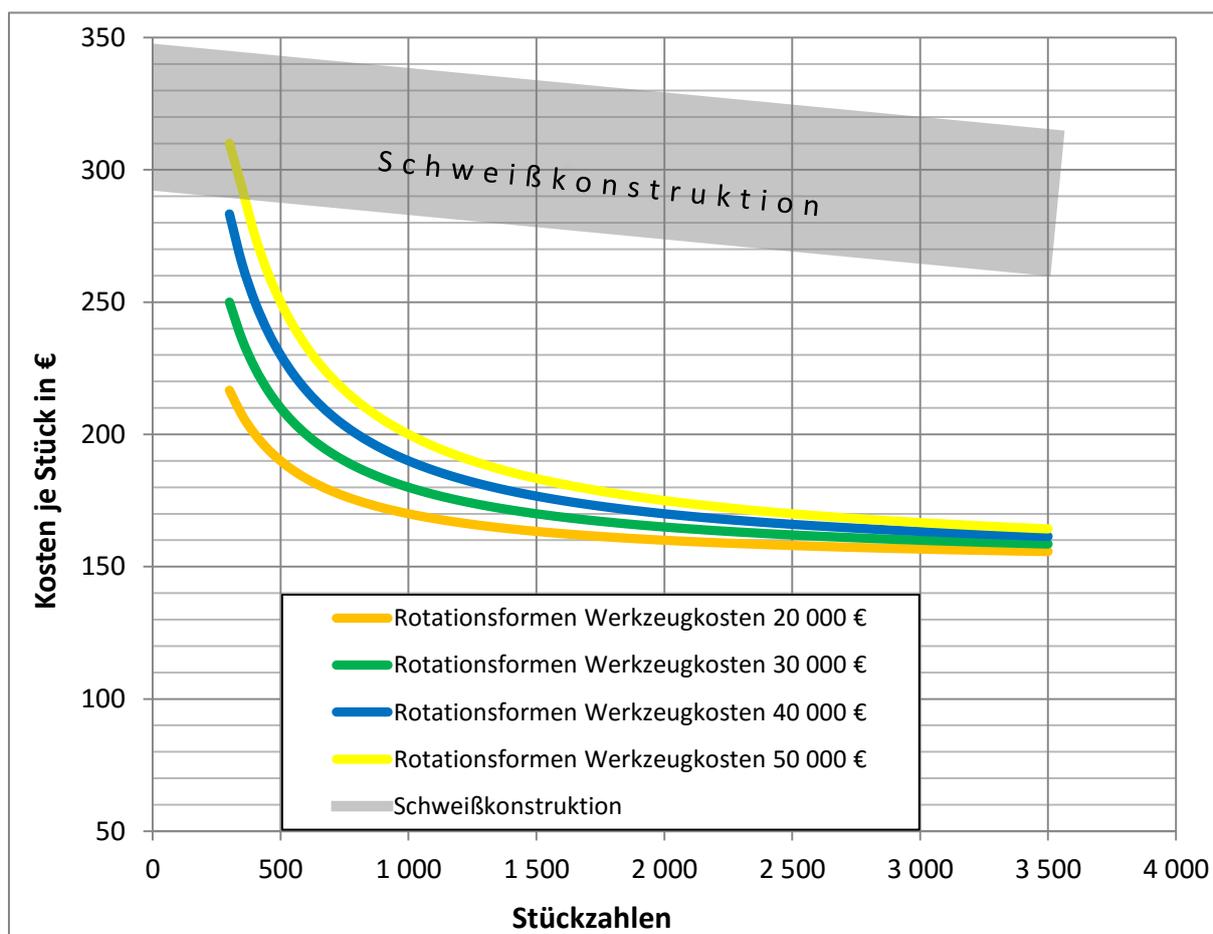


Abbildung 70: Gesamtkosten pro Stück für Rotationsformen und Schweißkonstruktion

Leider wurden die beiden in dieser Arbeit behandelten Projekte nicht verwirklicht, da die Firma Knorr-Bremse den Zuschlag dafür nicht erhielt. So wurde auch keine detaillierte fertigungsgerechte Konstruktion von der Firma Promens erstellt und keine Festigkeitsberechnung durchgeführt. Diese wird normalerweise in einer anderen Abteilung in Auftrag gegeben und dies bedeutete einen zu hohen Aufwand. Natürlich konnte auch keine mechanische Prüfung am Prüfstand vorgenommen werden, da kein Prototyp im Rotationsverfahren hergestellt wurde.

Also kann keine verlässliche Aussage gemacht werden, ob Sandkästen, die im Rotationsverfahren aus PE hergestellt werden, den Anforderungen im Bahnbetrieb standhalten können. Allerdings lassen die Aussagen der Firma Promens und die Produkte und Anwendungsbereiche von Rotationsformteilen (siehe Kapitel 5.5 und 6.2) darauf schließen, dass die Verwendung als Sandbehälter möglich ist.

Zur erstmaligen Verwirklichung müsste ein Projekt konkret ausgearbeitet werden, eine Festigkeitsberechnung durchgeführt werden, ein Prototyp hergestellt werden und eine mechanische Prüfung am Prüfstand vorgenommen werden. Dies erfordert natürlich ein gewisses Risiko und Kosten, um die Umsetzbarkeit des Projektes überprüfen zu können.

## 8 Exkurs: Konstruktion eines Prototypen einer Sandungsanlage

In Kapitel 2.5 wurden die Funktionsweisen der verschiedenen Sandungsanlagen erklärt. Die Förderung des Sandes erfolgt pneumatisch nach dem Überdruck-, Unterdruck- oder kombiniertem Überdruck-/Unterdruckprinzip. Der Sand tritt in allen drei Fällen senkrecht nach unten aus der Sandungsanlage aus, dadurch wird viel Raum für den Einbau der Sandungsanlage benötigt. Beim Schnellbahnprojekt befindet sich der Bodenflansch des Trichters auf einer Höhe von 165 mm, die Höhe des Einbauraums beträgt 345 mm (siehe Abbildung 43). Es wird also fast die Hälfte der zur Verfügung stehenden Höhe von der Sandungsanlage beansprucht. Im Zuge der Ausarbeitung des Straßenbahnprojektes wurde ein Prototyp einer Sandungsanlage mit horizontalem Sandaustritt entwickelt. So wird der Einbauraum besser ausgenutzt und ein größeres Sandvolumen erzielt.

Auf den folgenden Seiten werden die Konstruktionszeichnungen der neuen Sandungsanlage gezeigt. Es wurden zwei Varianten der Anlage entwickelt:

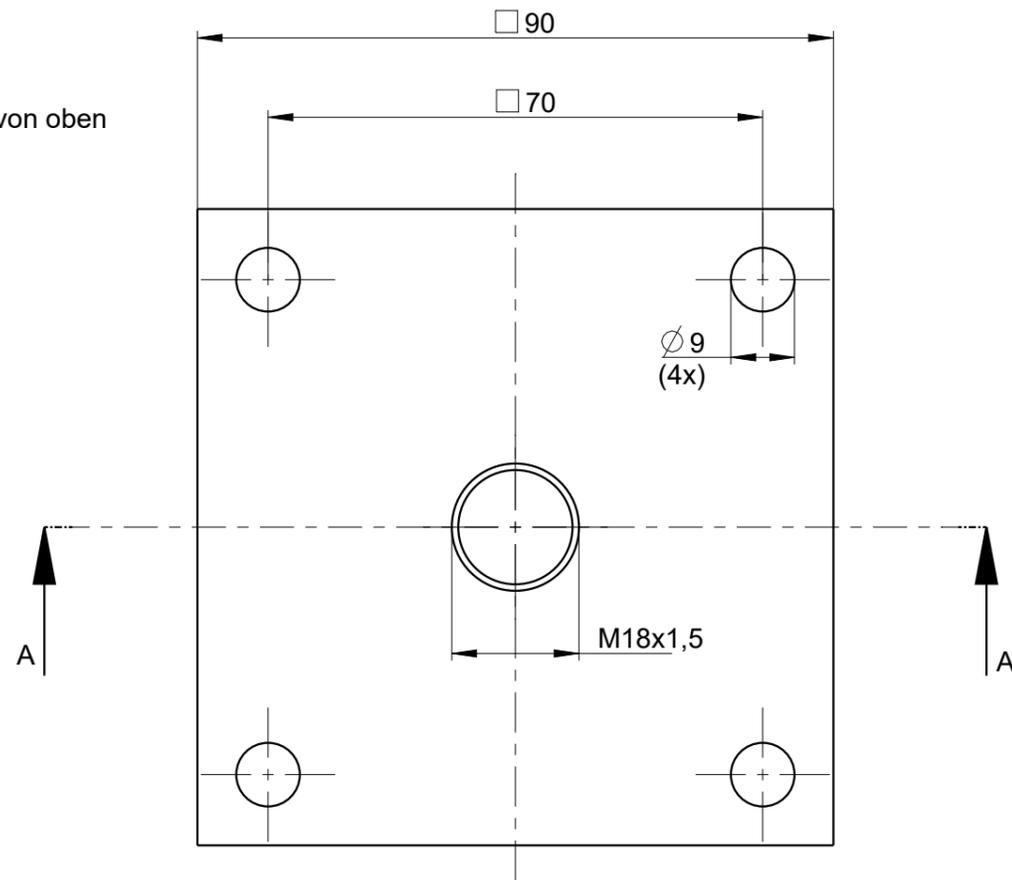
- Variante 1: Flansch 90x90 mm, keine Heizpatrone, nur Sandungsfunktion
- Variante 2: Flansch 120x120 mm, mit Heizpatrone, Sandungs- und Trocknungs-/Ausblasfunktion

Die Sandungsanlage arbeitet nach dem Unterdruckprinzip. Beim Sandungsvorgang wird an den pneumatischen Anschluss Sanden Druckluft angelegt und Luft strömt durch eine Düse in den Sandungskanal. Durch diesen Luftstrom entsteht im Sandungsstutzen Unterdruck, welcher den Sand ansaugt und über die Sandglocke in den Sandungskanal fördert. Der Sand wird mit hoher Geschwindigkeit in das horizontale Sandrohr geblasen. Die Position der Düse ist veränderbar, sodass der Einfluss der Position der Düse in Versuchen und Messungen eruiert werden kann und die optimale Einstellung gefunden werden kann.

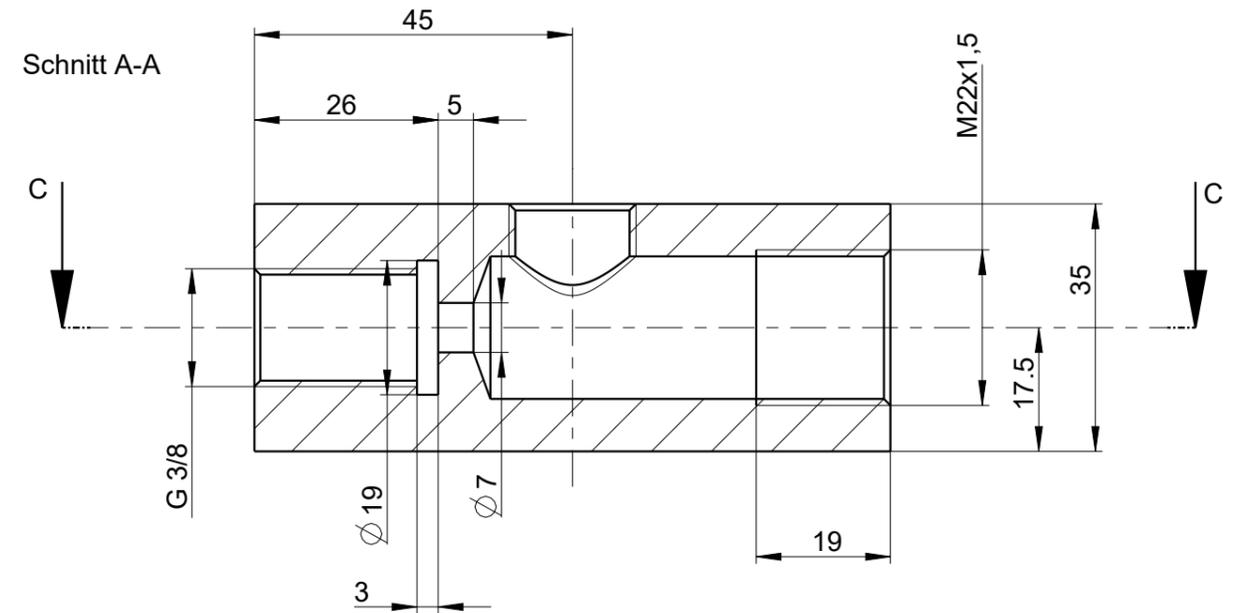
Bei der Trocknung des Sandvorrats und dem Ausblasen des Sandschlauchs wird an den pneumatischen Anschluss Trocknen/Ausblasen Druckluft angelegt. Luft strömt dann über die Heizpatrone in den Sandungskanal und von dort einerseits weiter über den Sandungsstutzen in den Sandkasten, um den Sand zu trocknen und aufzulockern. Andererseits strömt Luft direkt weiter in das Sandrohr, um den Sandschlauch auszublasen.

Die folgenden Zeichnungen zeigen beide Varianten sowohl als Einzelteil als auch als Baugruppe. Die verwendeten Teile (Sandglocke, Sandungsstutzen, etc.) werden auch in den bestehenden Sandungsanlagen eingesetzt.

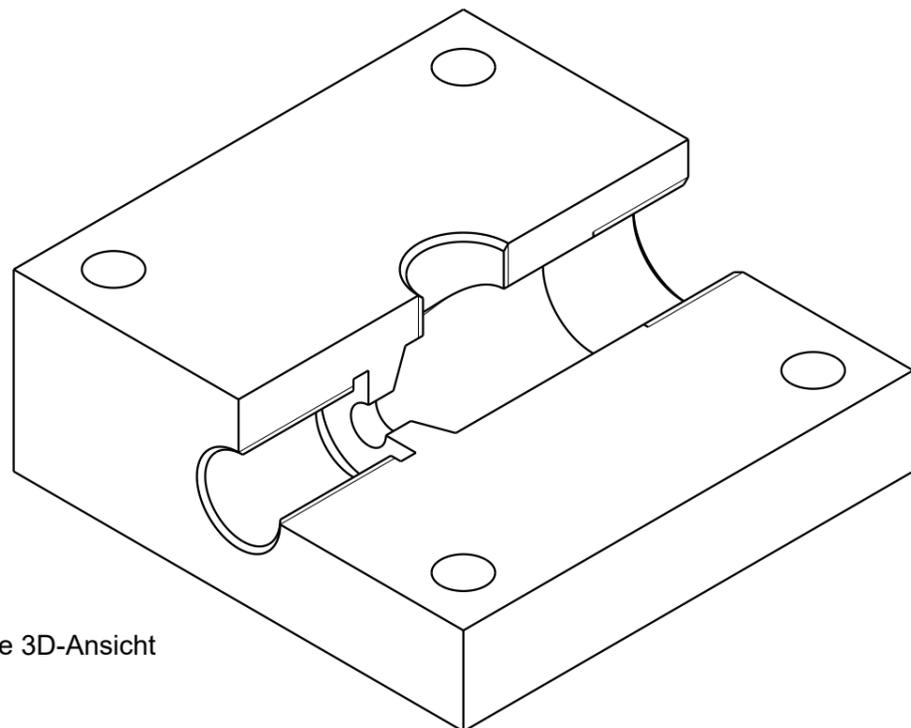
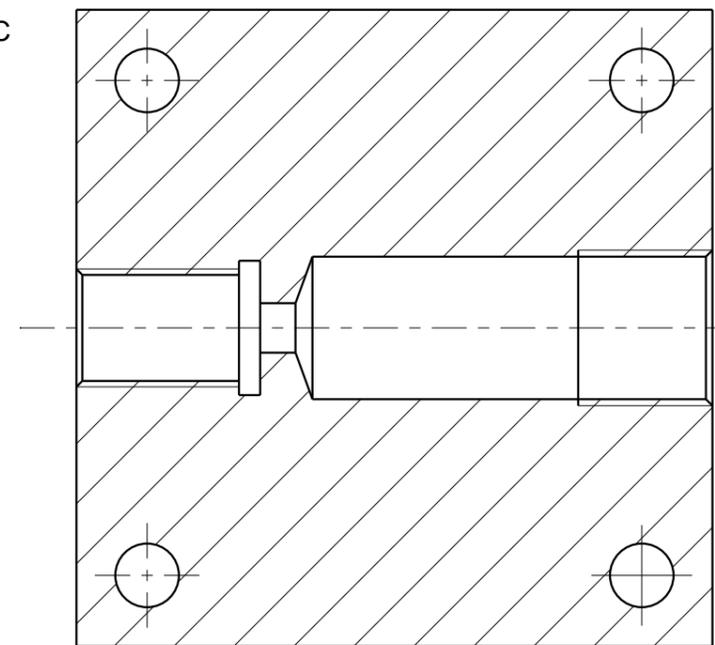
Ansicht von oben



Schnitt A-A

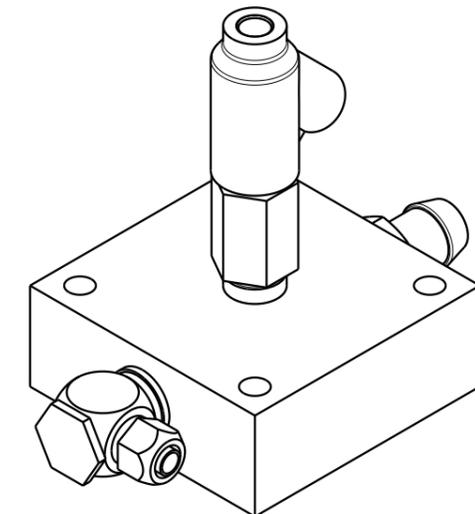
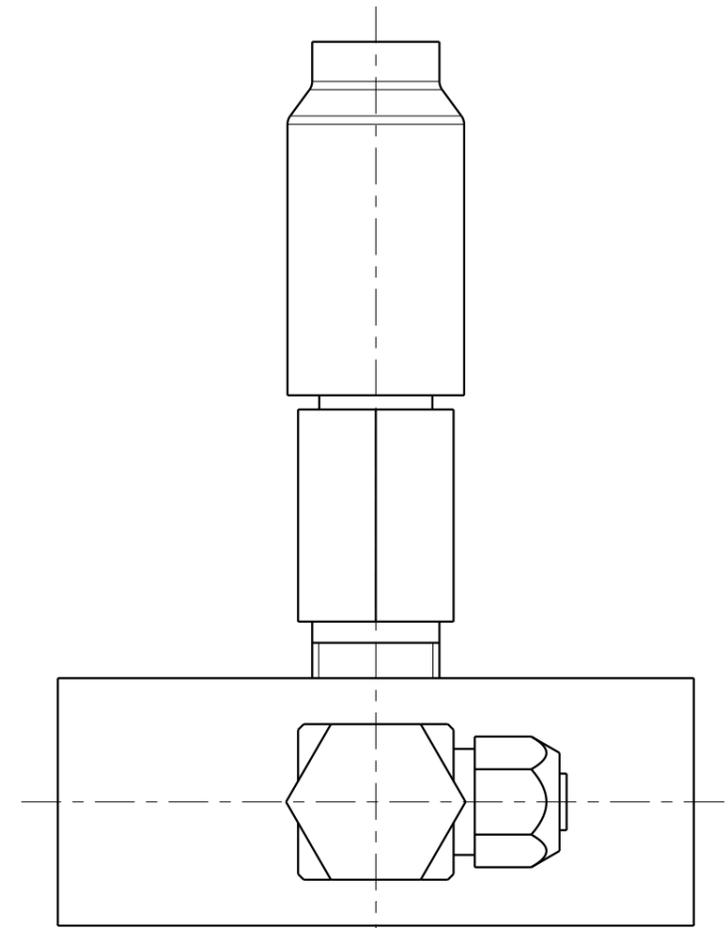
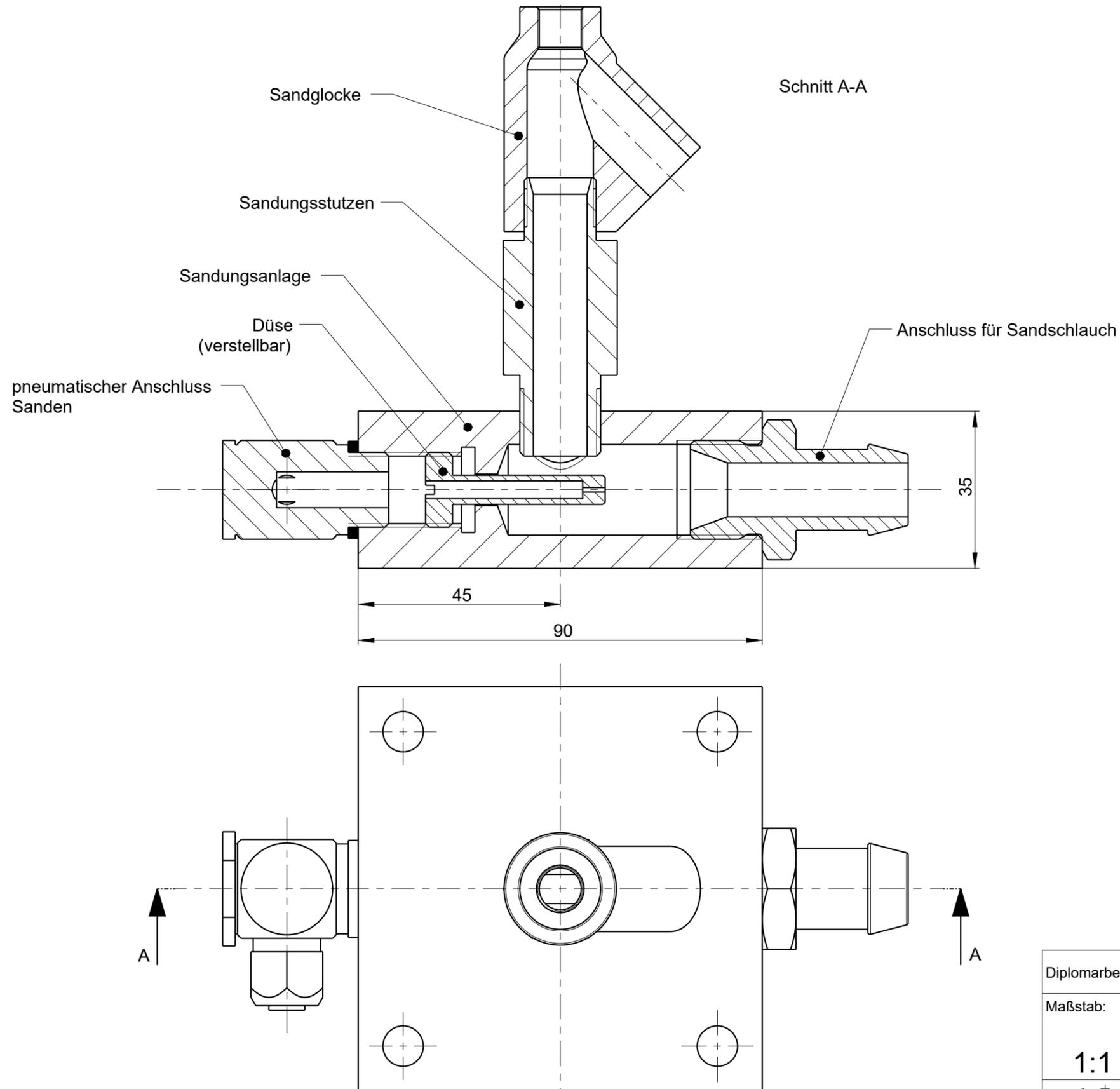


Schnitt C-C



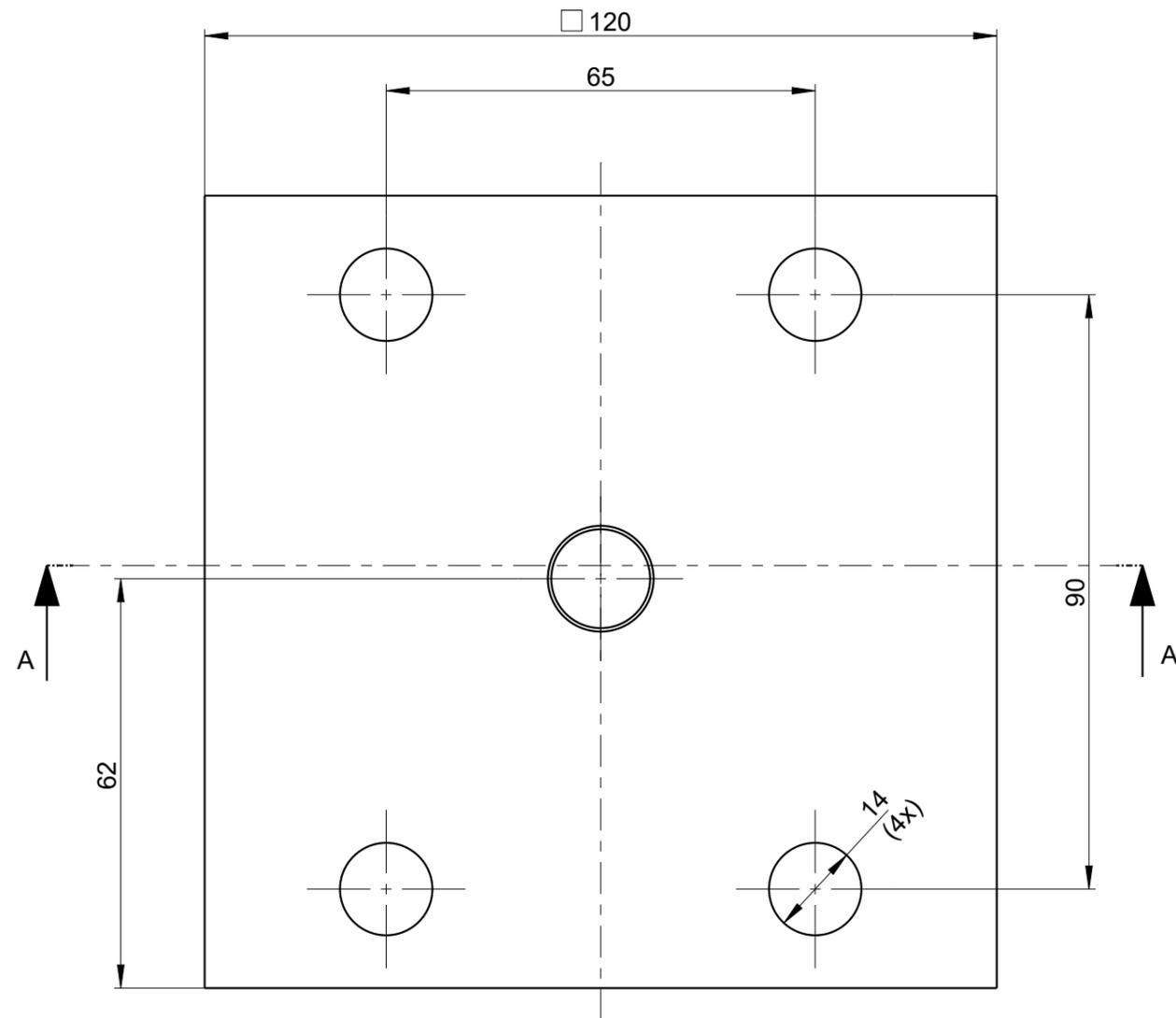
aufgeschnittene 3D-Ansicht

Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	<b>1:1</b> Einzelteil	Matr.nr.:	0126058
		Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
	TU Wien	Abbildung 71	Blatt 1 von 1
		Abgabedatum:	2015

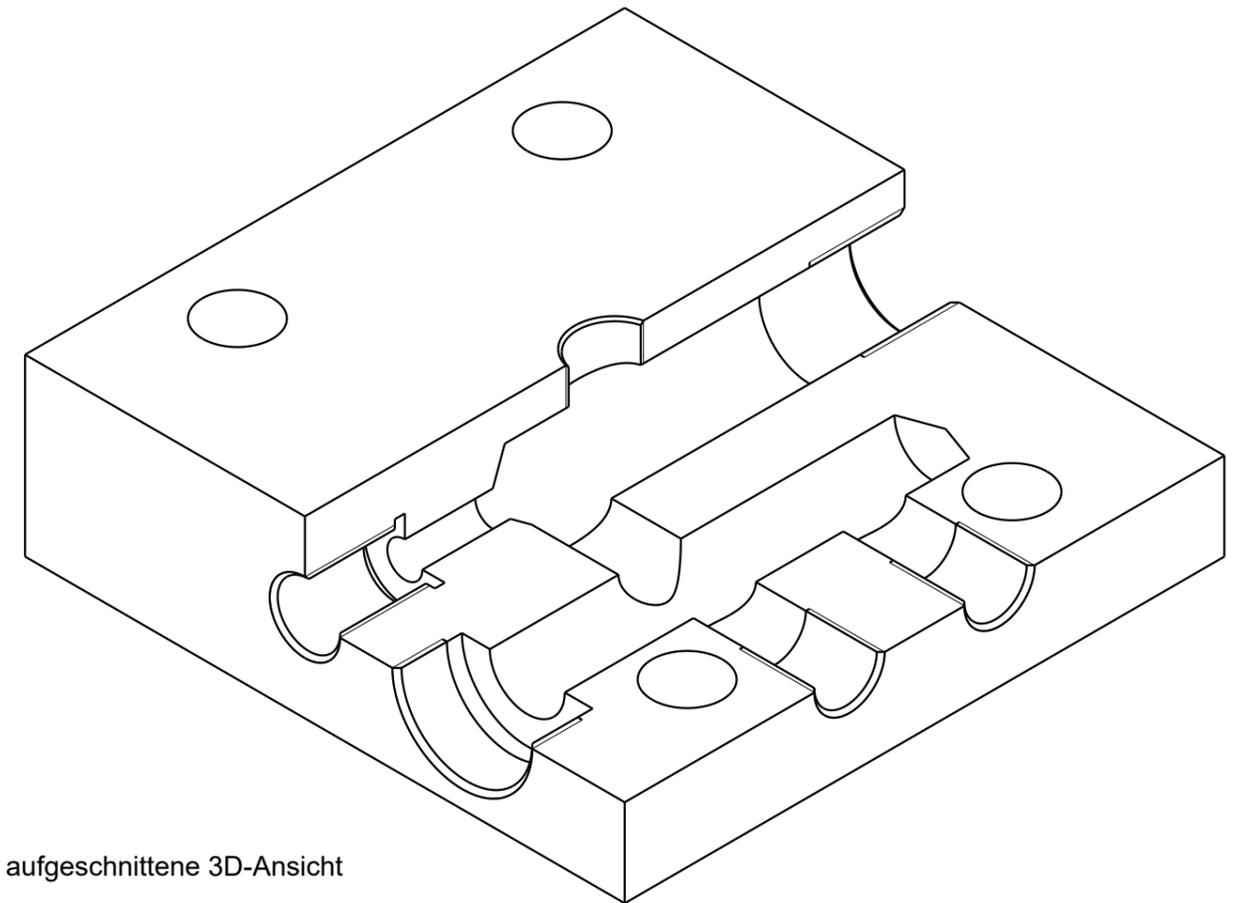


3D-Ansicht  
(1:2)

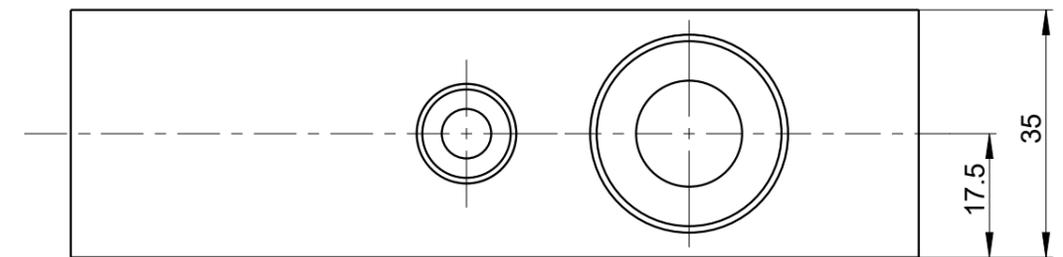
Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	<b>1:1</b> Sandungsanlage Var. 1 Baugruppe	Matr.nr.:	0126058
		Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
	TU Wien	Abbildung 72	Blatt 1 von 1
		Abgabedatum:	2015



Ansicht von oben



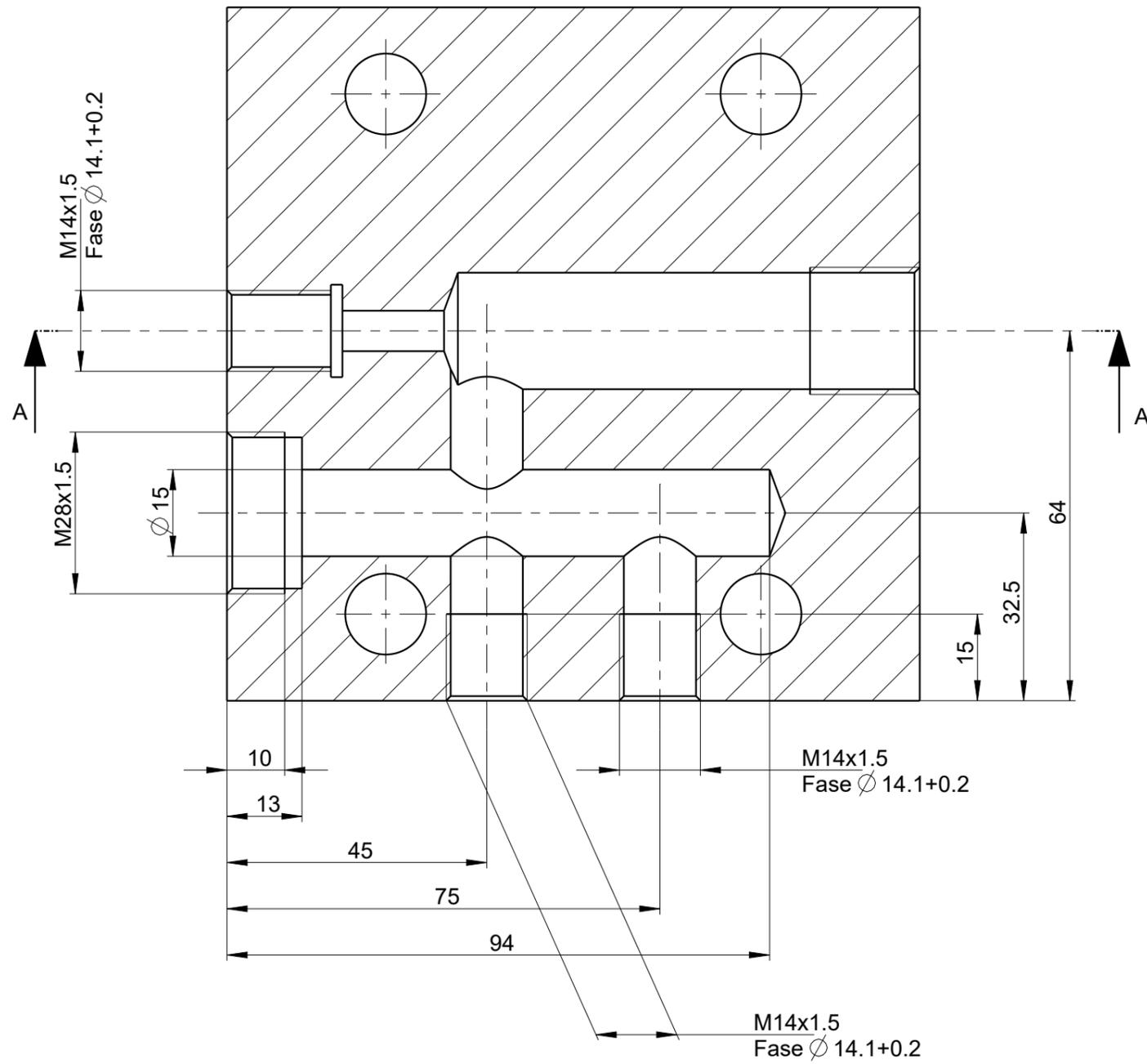
aufgeschnittene 3D-Ansicht



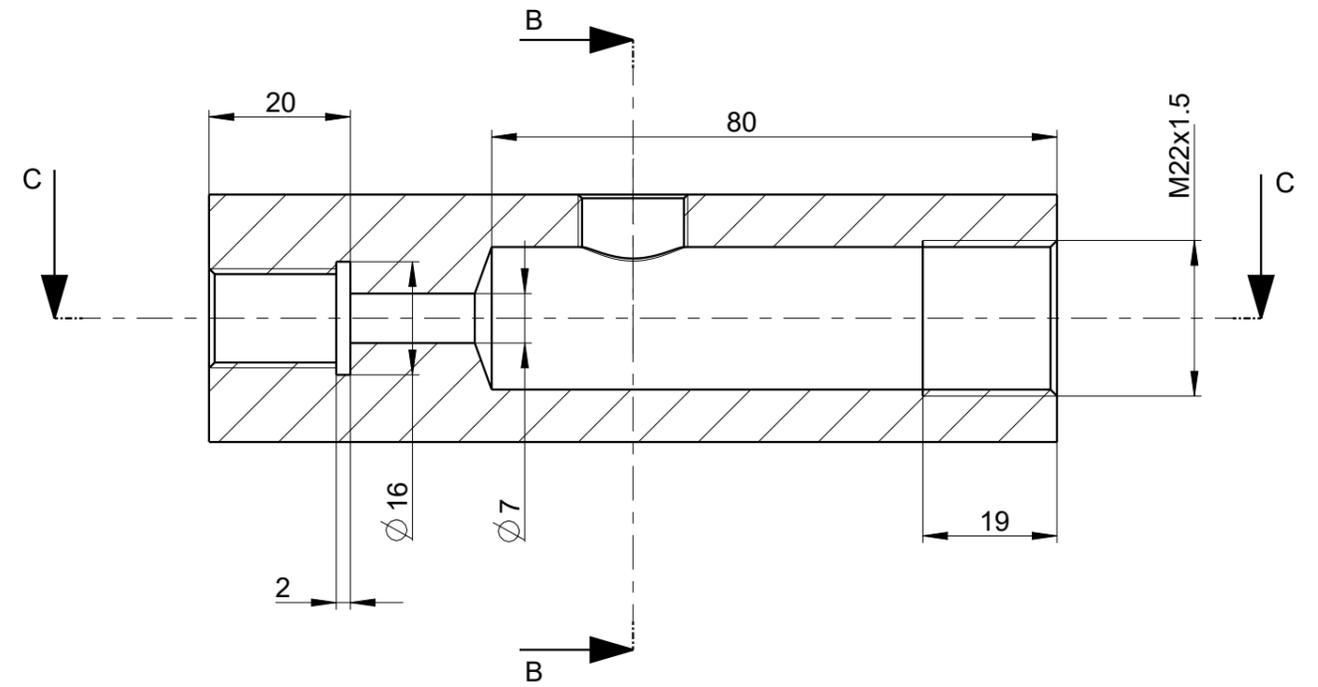
Ansicht von links

Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	<b>1:1</b> Einzelteil	Matr.nr.:	0126058
		Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
	TU Wien	Abbildung 73	Blatt 1 von 2
		Abgabedatum:	2015

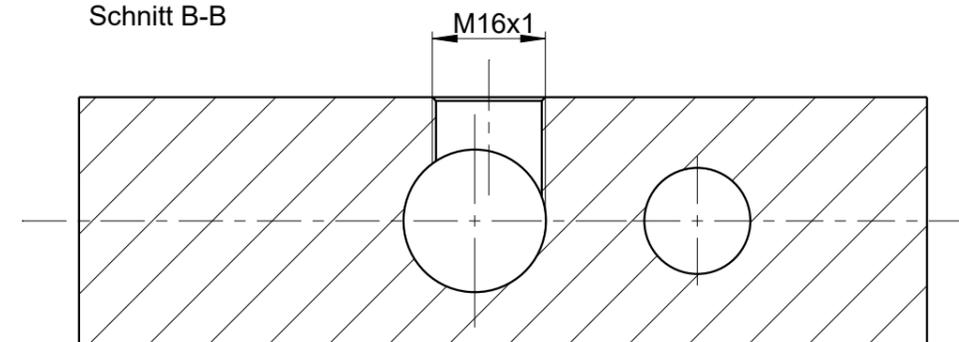
Schnitt C-C



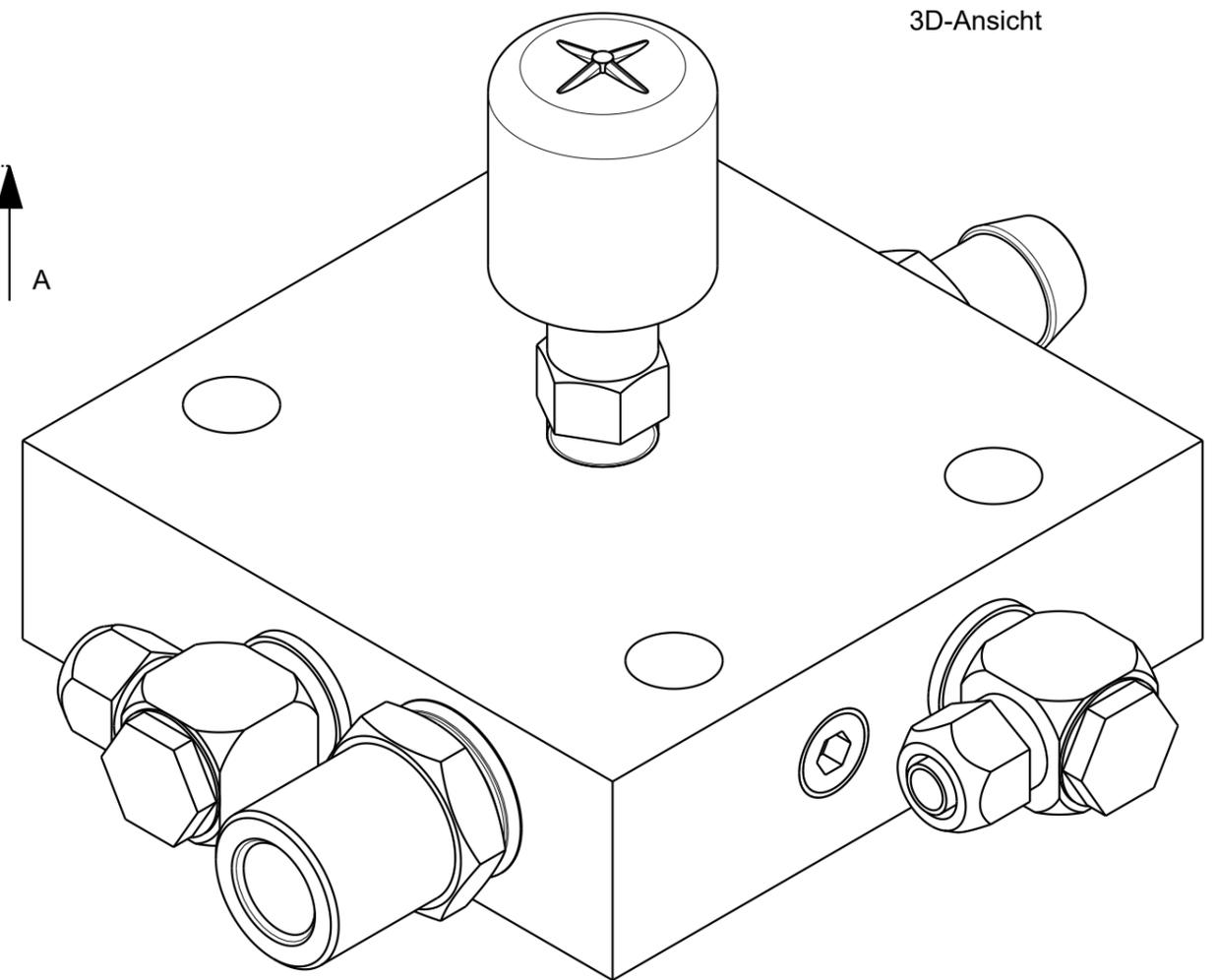
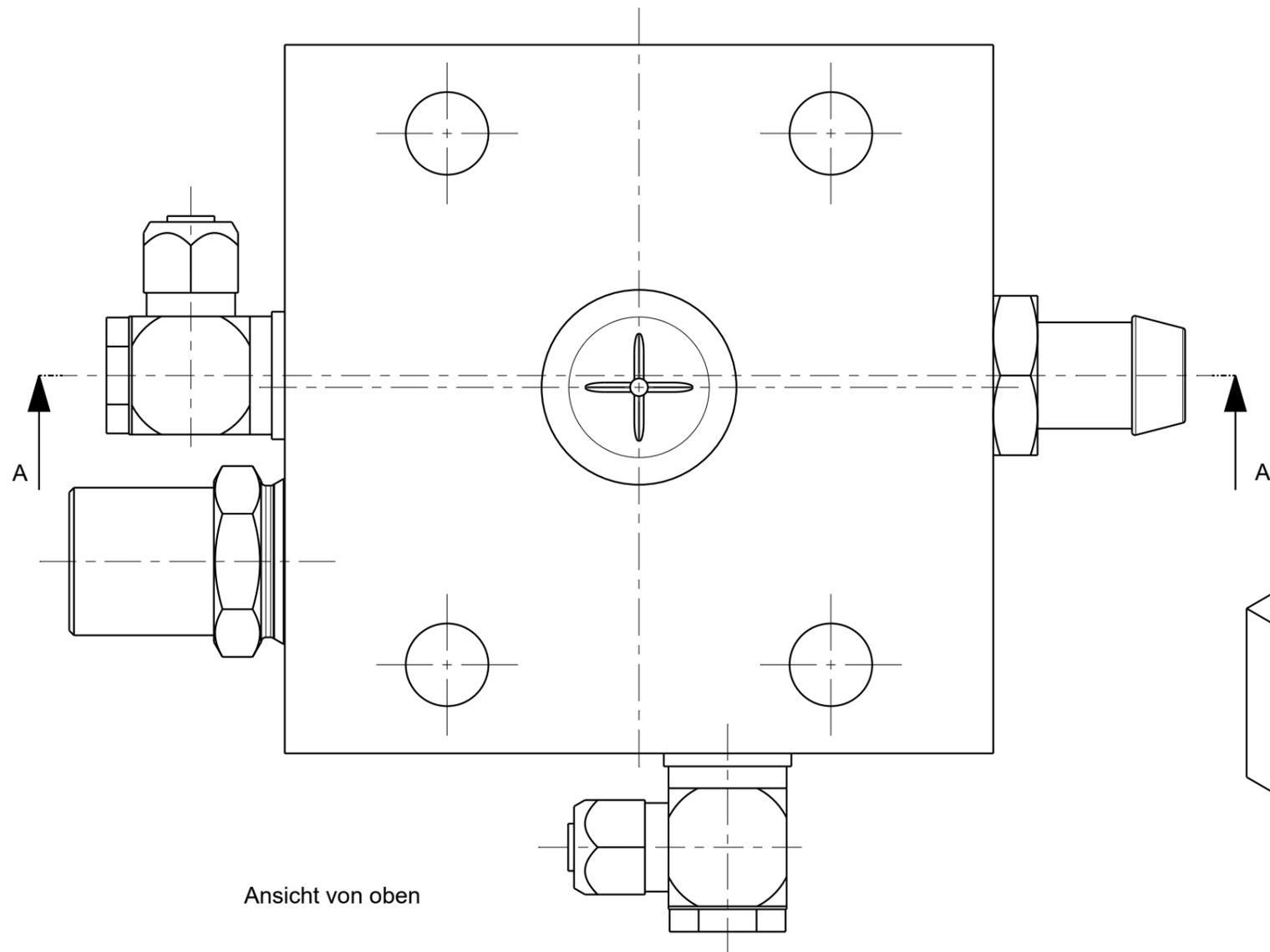
Schnitt A-A



Schnitt B-B

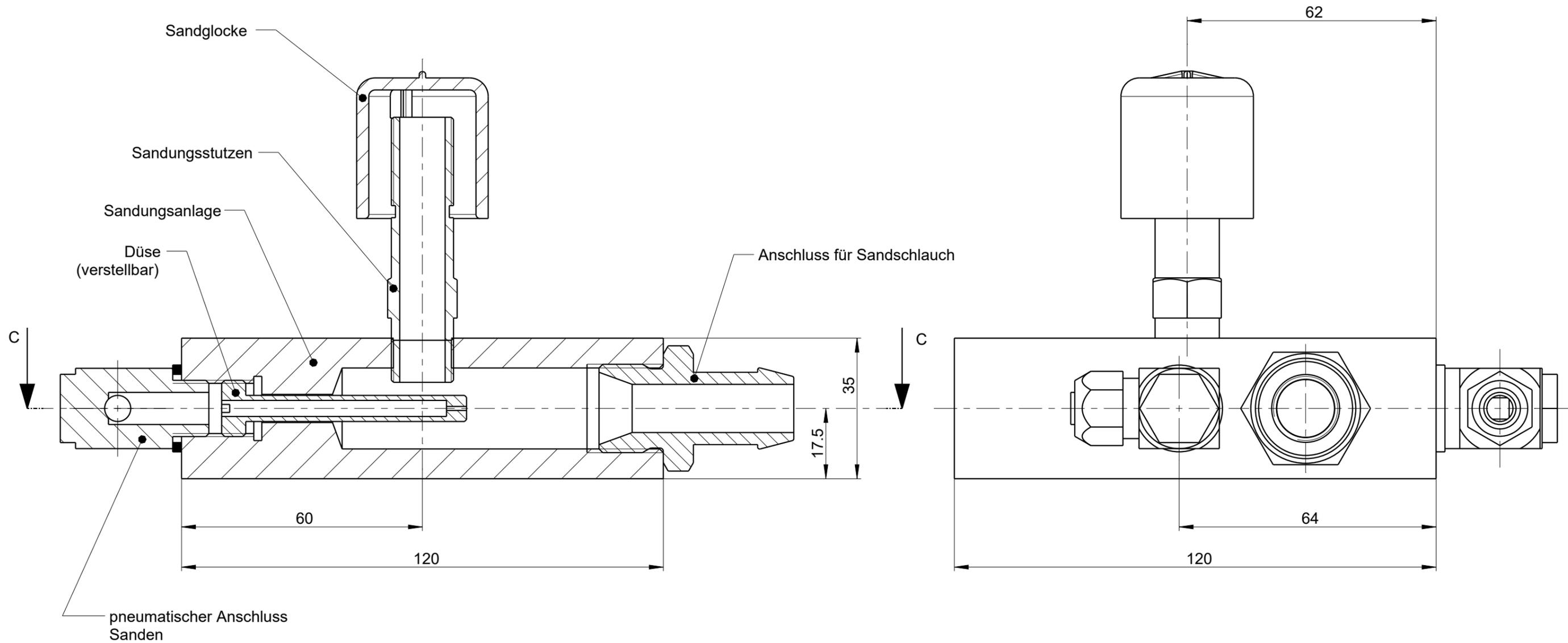


Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	<b>1:1</b> Einzelteil	Matr.nr.:	0126058
		Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
	TU Wien	Abbildung 73	Blatt 2 von 2
		Abgabedatum:	2015



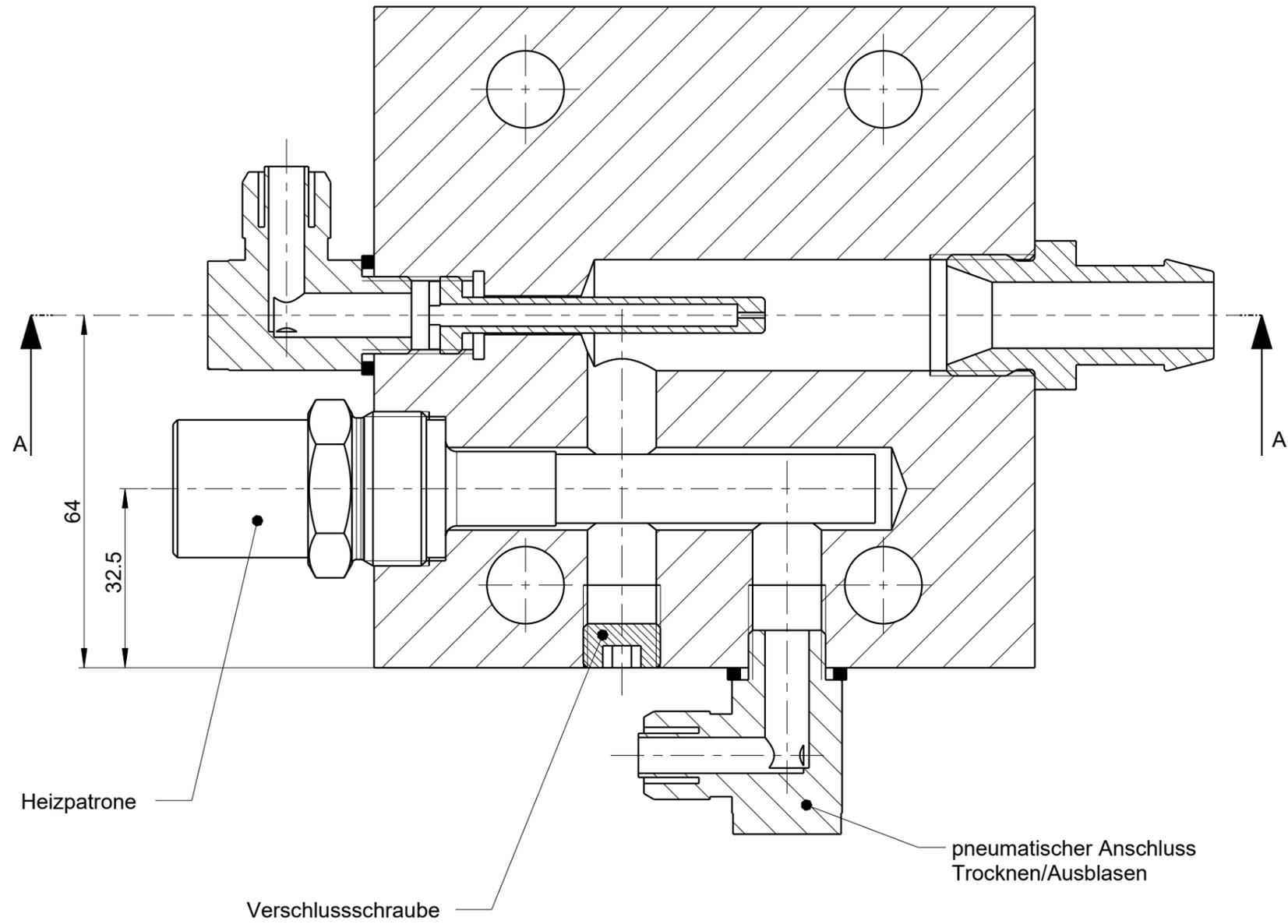
Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	<b>1:1</b>	Matr.nr.:	0126058
		Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
	TU Wien	Abbildung 74	Blatt 1 von 3
		Abgabedatum:	2015

Schnitt A-A



Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	<b>1:1</b>	Matr.nr.:	0126058
		Betreuer:	Prof. Klaus Hoffmann
	TU Wien	Abbildung 74	Blatt 2 von 3
		Abgabedatum:	2015

Schnitt C-C



Diplomarbeit:	Konzeptentwicklung für die Fertigung von speziellen Behältern für Sandungssysteme	Name:	Günther Tobolka
Maßstab:	<b>1:1</b>	Matr.nr.:	0126058
		Baugruppe	Betreuer:
	TU Wien	Abbildung 74	Blatt 3 von 3
		Abgabedatum:	2015

## 9 Literaturverzeichnis

Bombardier Inc. (2008a). *BR424-425, 425.2ff - zusätzliche Sandung*. Henningsdorf: Bombardier Inc.

Bombardier Transportation. (2008b). *Technische Beschreibung Flexity 2: Sandstreuanlage, Kapitel D - Systembeschreibung*. Wien: Bombardier Transportation.

Bombardier Transportation. (2009a). *Flexity 2 - Light Rail Vehicles*. Wien: Bombardier Transportation.

Bombardier Transportation. (2009b). *Flexity 2 Straßenbahn, Blackpool, Großbritannien*. Wien: Bombardier Transportation.

EN 61373. (2010). *Norm EN 61373*.

Eyerer, P., Hirth, T., & Elsner, P. (2008). *Polymer Engineering. Technologien und Praxis*. Berlin: Springer.

Fischer, D. (2008). *Systemvorstellung Sandstreuanlage: Plattform Flexity 2*. oA: Bombardier Inc.

Klein Anlagenbau AG. (2012). *Das mobile Sand-Tanksystem "Sandfloh"*. Niederfischbach: Klein Anlagenbau AG.

Klein Anlagenbau AG. (2013). *Besandungsanlagen*. Niederfischbach: Klein Anlagenbau AG.

Knorr-Bremse GmbH. (2002). *Sandungssysteme*. München: Unternehmenskommunikation Knorr-Bremse AG.

Knorr-Bremse GmbH. (2006). *Förderungsansuchen - Adhäsionsmanagement: Sandung und Spurkranzschmierung*. Mödling: Knorr-Bremse GmbH.

Knorr-Bremse GmbH. (2007). *Lastenheft Projekt: TCM Sandung*. Mödling: Knorr-Bremse GmbH.

Krismanic, G. (2008). *Zusammengefasstes Lastenheft: ET424/425*. Henningsdorf: Bombardier Inc.

Löser, H. (2007). *Technisches Lastenheft: Schienenfahrzeug - Bremssystem, Sandstreuanlagen*. München: Deutsche Bahn AG.

Mennig, G. (2008). *Werkzeugbau in der Kunststoffverarbeitung*. München: Hanser.

Michaeli, W. (2010). *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. München: Carl Hanser Verlag.

Schwarz, O., Ebeling, F.-W., & Furth, B. (2005). *Kunststoffverarbeitung*. Würzburg: Vogel Industrie Medien GmbH & Co. KG.

Siemens Aktiengesellschaft, 8. M. (2011). *Patentnr. WO 2011/154401 A1*. International.