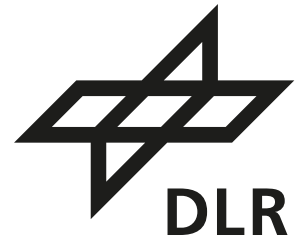




TU Clausthal



Technische Universität Clausthal

Masterarbeit

zum Thema

Konzeptentwicklung von Heliostat-Installationsfahrzeugen

Geschrieben am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.

Institut für Solarforschung, Jülich

Betreut von Dr.-Ing. Andreas Pfahl

Vorgelegt am Institut für Maschinenwesen

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel

Zweitgutachter: Dr.-Ing. Günter Schäfer

Lars Grobelny

Goslar, 30. August 2024

Abstract

In dieser Arbeit wurde ein Konzept zur automatischen Installation der Heliostaten von Solarturmkraftwerken entwickelt, mit dem maßgeblichen Ziel, die Installationskosten zu senken. Das zugrundeliegende Heliostat-Design ist eine Entwicklung des *Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V.* Nach einer Diskussion verschiedener Arten des Fundaments, wurde die Pfahlgründung aufgrund ihrer geringen Stückkosten pro Heliostat ausgewählt. Die Umsetzbarkeit wurde durch die Berechnung der Windlasten und der Standsicherheit untersucht.

Als Einbringmethode der Pylone wurde das Vibrationsrammen gewählt, da es durch geringste Bauteilbelastung das Einbringen der sehr dünnwandigen Pylone ermöglicht. Beschädigungen durch Steine, wie Knicken oder Beulen, werden durch ein massives Innenrohr als temporärer Knickschutz verhindert.

Als Folge des Rammens ist die Installation eines Heliostaten in zwei Prozessschritten notwendig – das Rammen der Pylone und die Montage des Konzentrators mit Nachführeinheit. Die Montage erfolgt über Dünnschrauben, welche als Fügeverfahren vor dem Hintergrund der Anforderungen als optimal bewertet wurden. Für einen effizienten Transport der Bauteile und für die Installation von mehreren tausend Heliostaten auf einem Solarfeld wurden verschiedene Installations-/Materialflusskonzepte erarbeitet und insbesondere hinsichtlich der resultierenden Installationskosten bewertet.

Resultierend daraus wurden Fahrzeugkonzepte zur automatischen Durchführung der beiden Prozessschritte sowie für den Materialtransport abgeleitet und ein Designvorschlag vorgestellt: Ein schweres Raupenfahrzeug für das Rammen der Pylone und zwei kleinere Fahrzeuge für den Transport und die Montage der Konzentratoren mit Nachführeinheit. Das Gesamtkonzept ermöglicht eine automatisierte und kosteneffiziente Installation des Solarfeldes.

Abstract (engl.)

In this thesis, a concept for the automated installation of heliostats of solar tower power plants was developed with the main aim of reducing the installation costs. The heliostat design is a development of the *German Aerospace Center*. After discussing different types of foundations for the installation, the pile foundation was selected due to its low unit costs per heliostat. The feasibility was examined by calculating the wind loads and the structural stability.

Vibratory pile driving was chosen as the method for driving the pylons into the ground as it enables the pile driving of very thin-walled pylons with minimal stress on the component. Damage caused by stones, such as buckling or denting, is prevented by a solid inner tube as temporary buckling protection.

As a consequence of the piling, the installation of a heliostat requires two process steps – piling the pylons and assembling the concentrator with tracking device. The assembling is carried out using thin sheet metal screws, which were assessed as the optimum joining method considering the requirements. To ensure efficient transport of the components and efficient installation of several thousand heliostats on the solar field, various installation/material flow concepts were developed and weighed up against each other particularly in terms of the resulting installation cost.

As a result, vehicle concepts for the automatic execution of the two process steps and for the material transport were derived and a design proposal was presented: A heavy tracked vehicle for piling the pylons and two smaller vehicles for transporting and assembling the concentrators with tracking devices. The overall concept enables automated and cost-efficient installation of the solar field.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit

Konzeptentwicklung von Heliostat-Installationsfahrzeugen

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe und dass alle Stellen dieser Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, als solche kenntlich gemacht wurden und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsstelle vorgelegt wurde.

Des Weiteren erkläre ich, dass ich mit der öffentlichen Bereitstellung meiner Abschlussarbeit in der Instituts- und/oder Universitätsbibliothek einverstanden bin / ~~nicht einverstanden bin~~.

Goslar, den 30. August 2024

(Lars Grobelny)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Aufbau Solarthermischer Turmkraftwerke	2
1.3. Stand der Technik	6
1.3.1. Existierende Anlagen und Ausbauziele	6
1.3.2. Verschiedene Bauarten von Heliostaten	6
1.3.3. Installation von Heliostaten	9
1.4. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	12
1.4.1. Institut für Solarforschung	12
1.5. Aufgabenstellung & Heliostat-Design des DLR	15
2. Entwicklungsmethodik	17
2.1. Vorgehensweise	17
2.2. Anforderungen - Allgemein	18
2.3. Funktionsanalyse	20
3. Vorkonzeptionierung	21
3.1. Konzepte zur Fixierung	23
3.2. Konzept: Sockel	27
3.3. Konzept: Pylone als Pfahlfundament	29
3.3.1. Bestimmung der äußeren Belastung	29
3.3.2. Bestimmung der Tragfähigkeit des Pfahls	32
4. Konzeptionierung	37
4.1. Grundüberlegungen	37
4.2. Einbringen von Pfählen	38
4.2.1. Anforderungen – Pylone Einbringen	38
4.2.2. Stand der Technik & Systemanalyse	39
4.2.3. Auswahl des Einbringverfahrens	45

Inhaltsverzeichnis

4.3. Konzentrator-Montage	49
4.3.1. Anforderungen – Fügeverfahren	50
4.3.2. Eingrenzung der Fügeverfahren	52
4.3.3. Bewertung der Fügeverfahren	59
4.4. Installationsprozess	67
4.4.1. Anforderungen	68
4.4.2. Aufbau des Solarfeldes	70
4.4.3. Entwicklung des Gesamtprozess	72
4.4.4. Fahrzeuge und Trägergeräte	78
4.4.5. Szenarioberechnung	85
4.4.6. Auswertung der Berechnung	91
4.5. Navigation, Sensorik und automatisches Fahren	94
4.5.1. Anforderungen	94
4.5.2. Stand der Technik	95
4.5.3. Auswahl geeigneter Systeme	98
4.6. Zwischenfazit	100
5. Detaillierung	101
5.1. Prozessschritt 1 – Rammen der Pylone	101
5.2. Hydraulikbagger	102
5.3. LKW und Kettenfahrzeug	104
5.4. Konzentrator-Montage	110
5.4.1. Konzentrator-Ablagefahrzeug	111
5.4.2. Mobile Manipulator	115
6. Fazit	117
7. Literatur	119
A. Anhang	125
A.1. Aufgabenstellung	125
A.2. Anforderungsliste	129
A.3. Literaturauszüge	133
A.4. Berechnungsergebnisse Rammkräfte	134
A.5. Datenblätter	135
A.6. Szenarioberechnung	141
A.7. Anlagen	153

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Funktionsprinzip einer CSP Anlage & verschiedener Bauweisen.	3
1.2.	Jahresdurchschnitt der direkten Normalstrahlung (DNI).	4
1.3.	CSP Projekte global, in Betrieb und geplante Anlagen in MW.	5
1.4.	Solarturmkraftwerk PS10 (10 MW) und PS20 (20 MW), Spanien.	6
1.5.	Crescent Dunes, Nevada USA, mit einer Leistung von 110 MW.	7
1.6.	Pilotanlage des Startups <i>Synhelion SA</i> zur Kraftstoffherstellung.	7
1.7.	T-Type, Karussell-, Fixed Horiz. Axis, Target Alined Heliostat.	8
1.8.	Heliostat-Design der Firma <i>google.org</i> .	9
1.9.	Mobile Montagelinie der Firma <i>BrightSource Energy, Inc.</i>	10
1.10.	Autonomes Ablegen eines Heliostaten mit Sockelfundament.	11
1.11.	Vibrationsrammen von Pylonen durch <i>BrightSource Energy, Inc.</i>	11
1.12.	Solartürme des Instituts für Solarforschung des DLR.	13
1.13.	Meilensteine des Instituts für Solarforschung des DLR in Jülich.	13
1.14.	Solarturm und Multifokusturm des Inst. für Solarforschung, Jülich.	14
1.15.	Konstruktion des Heliostat-Designs des DLR.	16
1.16.	Prototyp des Heliostat-Designs des DLR in versch. Ansichten.	16
2.1.	Übergeordnete Funktionsstruktur.	20
3.1.	Exempl. Darstellung des Konzepts <i>Socket</i> als Spritzgussteil.	28
3.2.	Veranschaulichung der anliegende Windlasten.	30
3.3.	Zusammensetzung der axialen Tragfähigkeit eines Pfahls.	33
3.4.	Zusammenhang zwischen Setzung s und Traglast $Q(s)$.	34
3.5.	Veranschaulichung eines horizontal belasteten Pfahls.	35
3.6.	Min. axiale, axial dynamische und horizontale Traglast des Pfahls.	36
4.1.	Hydraulikbagger mit leichter Vibrationsramme, freireitend.	41
4.2.	Hydraulikbagger mit Teleskopmäkler.	42
4.3.	Seilbagger mit schwerer Vibrationsramme.	43
4.4.	LKW mit Baggerarm und teleskopmäklergeführter Ramme.	44
4.5.	Solar Pile Driver der Firma <i>Vermeer</i> ferngest. und mit Bediener.	44
4.6.	Auslastung der Pylone beim Rammen mit Sicherheitsfaktor 1.	46
4.7.	Vibrationsramme der Firma <i>PTC Fayat Group</i> .	49
4.8.	Teilung von Pylone und Konzentrator (mit Nachführeinheit).	50

Abbildungsverzeichnis

4.9. Dünnschraube mit Anwendungsbeispiel.	66
4.10. Veranschaulichung der Funktionsweise einer Dünnschraube.	66
4.11. Schraubautomat mit automatischer Schraubenzuführung.	67
4.12. Exemplarisches Solarfeld mit 2823 Heliostaten.	71
4.13. Veranschaulichung der Aufbaureihenfolge eines Solarfeldes	71
4.14. Autonome LKW der Firma <i>Götting KG</i>	79
4.15. Bagger mit freireitender Vibrationsramme der Firma <i>Skancraft</i>	79
4.16. Ferngesteuerter Solar Pile Driver der Firma <i>Orteco</i>	80
4.17. Stahlrampenfahrwerk und Hydraulikaggregat.	80
4.18. UGVs mit Gelenkarmroboter.	81
4.19. Greifstapler der Firma <i>Feyter Iberia</i>	82
4.20. Container-Transporter der Firma <i>Konecranes</i>	83
4.21. Transportdrohne der Firma <i>DJI</i> mit 30 bis 40 kg Nutzlast.	83
4.22. Auton. outdoortauglicher Routenzug der Firma <i>Innoks Robotics</i>	84
4.23. Stapler der Firma <i>Linde</i> umgerüstet zum autonomen Betrieb.	84
4.24. Allg. Veransch. des Berechnungsprinzips der Wegstrecken.	86
4.25. Qualitative Darstellung des Bewegungsprofils aller Fahrzeuge.	87
4.26. Konzept I veranschaulicht als Fahrroute nach Tabelle 4.11.	87
4.27. Konzept II veranschaulicht als Fahrroute nach Tabelle 4.11.	88
4.28. Konzept III veranschaulicht als Fahrroute nach Tabelle 4.11.	88
4.29. Konzept IV veranschaulicht als Fahrroute nach Tabelle 4.11.	89
4.30. Veranschaulichung der Installationskosten pro Heliostat.	93
4.31. Veransch. des ortsfesten und Fahrzeug-Koordinatensystems.	96
4.32. Veranschaulichung der verschiedenen Arten der Navigation.	98
4.33. Sicherheitslaserscanner mit Aufprallschutz.	99
5.1. Führung der Ramme.	105
5.2. Lagerung (Speichern) der Pylonen.	106
5.3. Handhabung/Zuführung der Pylone in die Ramme.	107
5.4. Greifer zum Greifen der Pylone.	108
5.5. Fügehilfen zum „Einfädeln“ des Innenrohrs in die Pylone.	108
5.6. Möglichkeiten der Bestückung der Ramme.	109
5.7. Fahrzeugkonzept zum Rammen der Pylone.	110
5.8. Art der Lagerung des Konzentrators auf dem Supply-Fahrzeug.	112
5.9. Spiegelstellung des Konzentrators beim Transport.	112
5.10. Handhabeinrichtung zum Ablegen des Konzentrators.	113
5.11. Mögliche Arten von Greifern zur Aufnahme des Konzentrators.	113
5.12. Möglichkeiten der Ablage des Konzentrators im Feld.	114
5.13. Konzept eines Ablagefahrzeugs (Supply-Fahrzeug).	115
5.14. UGV der Firma <i>Clearpath Robotics</i> mit Leichtbauroboter.	116

6.1. Veranschaulichung des Installationsprozesses eines Solarfeldes. . .	118
A.1. Werte des Pfahlspitzenwdst. und der Pfahlmantelreibung.	133
A.2. Rammkraft in Abhängigkeit von der Rammtiefe und Bodenart . . .	134
A.3. Bodenwiderstandskraft und resultierende Bauteilspannung. . . .	134
A.4. Datenblatt, Vibrationsrammen der Firma <i>PTC Fayat Group</i> 1. . .	136
A.5. Datenblatt, Vibrationsrammen der Firma <i>PTC Fayat Group</i> 2. . .	137
A.6. Veranschaulichung eines Berechnungsskripts Teil 1.	141
A.7. Veranschaulichung eines Berechnungsskripts Teil 2.	142
A.8. Abschätzung der Ladekapazitäten von Konzentratoren.	143

Tabellenverzeichnis

2.1. Grobe Bewertungsskala für Vorauswahl.	17
2.2. Werteskala nach Richtlinie VDI 2225.	18
2.3. Allgemeine Anforderungen an die Installation eines Solarfeldes. . .	19
3.1. Konzepte zum Verbinden der Heliostaten mit dem Boden	22
3.2. Verschiedene Konzepte eines Sockelfundaments.	27
3.3. Windgeschwindigkeiten der einzelnen Lastfälle.	31
3.4. Spitzenwindlastkoeffizienten für das Seitenverhältnis $r_a = 1$. . .	31
3.5. Geometrieparameter des betrachteten Heliostaten.	31
3.6. Ergebnisse der Windlastberechnung.	32
4.1. Anforderungen für das Einbringen der Pylone als Pfahl.	38
4.2. Verschiedene Methoden des Einbringens der Pylone in den Boden. 46	
4.3. Möglichkeiten das Beulen der Pylone zu verhindern	48
4.4. Anforderungen für Fügen des Konzentrators auf der Pylone. . .	51
4.5. Veransch. der Zugänglichkeit beim Fügen der Rohrstümpfe. . . .	53
4.6. Anwendbare Fügeverfahren nach Hauptgruppen gemäß DIN 8593. 54	
4.6. Anwendbare Fügeverfahren nach Hauptgruppen gemäß DIN 8593. 55	
4.6. Anwendbare Fügeverfahren nach Hauptgruppen gemäß DIN 8593. 56	
4.7. Variation der Fügeverfahren aus Tabelle 4.6.	57
4.7. Variation der Fügeverfahren aus Tabelle 4.6.	58
4.8. Bewertung der Fügeverfahren und Berechnung Wertigkeit. . . .	65
4.9. Anforderungen an den Installationsprozess.	69
4.10. Morphologischer Kasten zu Installations-/Materialflusskonzepten. 73	
4.11. Lösungspfade gebildet aus Teillösungen der Tabelle 4.10.	77
4.12. Anforderungen an die Navigation, Sensorik und autom Fahren. . .	95
5.1. Gestaltungsvorschläge für einen Hydraulikbagger.	103

1. Einleitung

1.1. Motivation

Vor dem Hintergrund der globalen Energiewende im Kontext des Klimawandels und der damit verbundenen Abkehr von fossilen Energieträgern stehen erneuerbare Energiequellen im Fokus der Entwicklung. Neben der Windkraft- ist die Solarenergie ein Schlüsselement hin zu einer emissionsfreien Energieversorgung. Parallel zu den weit verbreiteten Photovoltaikanlagen existiert schon seit Längerem, allerdings weniger verbreitet, das Konzept der solarthermischen Kraftwerke, engl. Concentrating Solar Power plants (CSP plants).

Photovoltaikanlagen sind für Privatpersonen, Unternehmen und Energieerzeuger einfach skalierbar. Dagegen sind CSP Anlagen vergleichbar mit konventionellen Kraftwerken. Durch die Kombination aus Energieerzeugung und thermischer Energiespeicherung kann eine konstante Energieeinspeisung – auch nachts – erreicht werden. CSP Anlagen bedienen sich zudem grundsätzlich den Elementen des konventionellen Maschinen- und Anlagenbaus, in denen die deutsche Industrie große Kompetenz besitzt, sodass hier hohe wirtschaftliche Chancen bestehen. [Ben+21]

Neben der grundlastfähigen Stromeinspeisung sind CSP Anlagen prädestiniert für die Bereitstellung von Prozesswärme. Zudem ist die Herstellung synthetischer Kraftstoffe möglich, wobei theoretisch höhere Wirkungsgrade als bei Wasserelektrolyseverfahren erreicht werden. [Ben+21]

Ein Schlüsselement zur wirtschaftlichen Durchsetzung erneuerbarer Energien ist, dass die Stromgestehungskosten, engl. levelised cost of electricity (LCOE), im Vergleich zu konventionellen Energien gesenkt werden. Eine gesamtheitliche Optimierung aller Komponenten entlang der Prozesskette ist daher von großer Bedeutung.

Eine Bauform bilden die Solarthermischen Turmkraftwerke. Bei diesen wird ein Anteil von ca. 40% der Gesamtkosten von dem Solarfeld, welches aus mehreren tausend Heliostaten besteht, verursacht. Neben der Optimierung der Konstruktion der Heliostaten, trägt auch die Senkung der Installationskosten dazu bei, die Kosten des Solarfelds zu senken. [Der+20]

Im Rahmen dieser Arbeit soll daher ein Konzept für eine kostenoptimierte Installation der Heliostaten bzw. des Solarfeldes entwickelt werden.

1.2. Aufbau Solarthermischer Turmkraftwerke

Solarthermische Kraftwerke konzentrieren das Sonnenlicht durch Spiegel auf einen Empfänger, wodurch dieses in Wärme umgewandelt wird. Die gewonnene Wärmeenergie wird in ein Medium geleitet, beispielsweise ein Thermoöl oder eine Salzschnmelze, welches als Wärmespeicher dient und zur Erzeugung von Dampf genutzt wird. Mit dem entstehenden Dampf kann eine Dampfturbine angetrieben werden, um Strom zu erzeugen. Durch die Wärmespeicherung ist es möglich, Strom bei Bedarf zu produzieren. Zudem können, bei nicht ausreichender Sonneneinstrahlung über einen längeren Zeitraum, die Kraftwerke hybrid mit einer Zusatzfeuerung betrieben werden. Heutige Anlagen liegen im Bereich von 50 bis 200 Megawatt. Auch die Kombination mit Photovoltaikanlagen wird angewendet, wobei der Nachtstrom durch die CSP Anlage bereitgestellt wird. Auch die überschüssige Energie der Photovoltaikanlage kann durch Heizelemente im thermischen Speicher der CSP Anlage gespeichert werden. Preislich ist dies attraktiv, da die Energiespeicherung in Form von Wärme deutlich kostengünstiger ist als z.B. eine batterieelektrische Speicherung. [Ben+21]

Um das Sonnenlicht zu konzentrieren, wird die direkte Sonneneinstrahlung von Spiegeln, welche der Sonne nachgeführt werden, auf einen Brennpunkt (Solarturmkraftwerk) oder eine Brennpunktlinie (Parabolrinnen- und Linear-Fresnel-Reflektor Kraftwerk) gebündelt. Das grundsätzliche Funktionsprinzip sowie die verschiedenen Bauweisen sind in Abbildung 1.1 dargestellt. [MSU99]

Bei Solarturmkraftwerken, wie dem des *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.* (DLR) in Jülich, konzentrieren zweiachsig geführte Spiegel (Heliostaten) mit einer Spiegelfläche von jeweils bis zu 200 Quadratmetern die Sonneneinstrahlung auf einen Empfänger (Receiver) oberhalb des Turmes. Je nach verwendeter Reivertechnologie und verwendetem Wärmeträgermedium werden so Temperaturen von 300 bis 700°C erreicht. [Ben+21]

Das Solarfeld, bestehend aus 2000 bis 10000 Heliostaten, trägt mit aktuell ca. 40% maßgeblich zu den Kraftwerkskosten bei. Die Herausforderung ist, bei niedrigsten Kosten, die notwendige optische Präzision zu erreichen und gleichzeitig den Umwelteinflüssen wie Wind oder Korrosion standzuhalten. [Der+20]

Für den Betrieb von solarthermischen Kraftwerken ist neben ökonomischen und ökologischen Standortfaktoren die direkte Normalstrahlung der Sonne, engl. Direct Normal Irradiation (DNI), elementar. Abbildung 1.2 zeigt eine Weltkarte mit Jahresdurchschnittswerten der DNI. Es ist ersichtlich, dass insbesondere Gebiete ober- und unterhalb des Äquators sowie Orte mit großer Höhenlage geeignet sind.

1.2. Aufbau Solarthermischer Turmkraftwerke

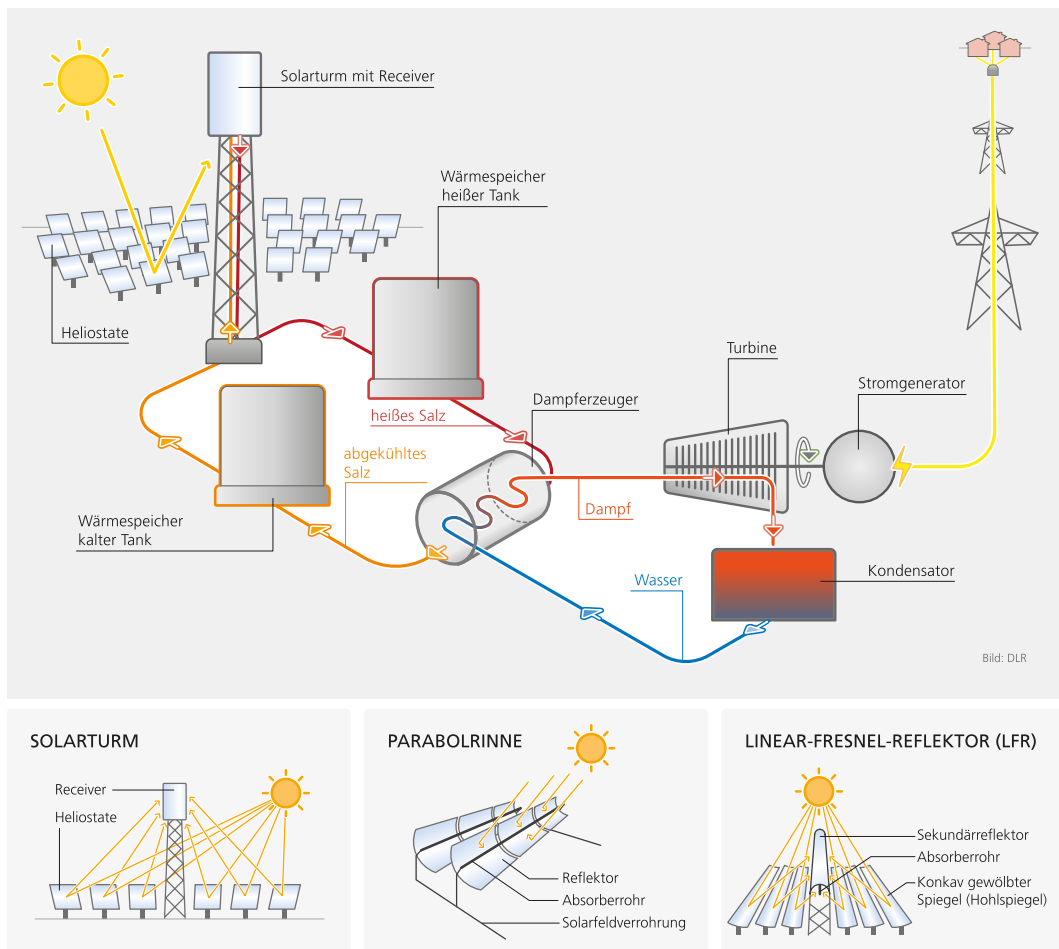


Abbildung 1.1.: Funktionsprinzip einer CSP Anlage und Veranschaulichung verschiedener Bauweisen [Ben+21].

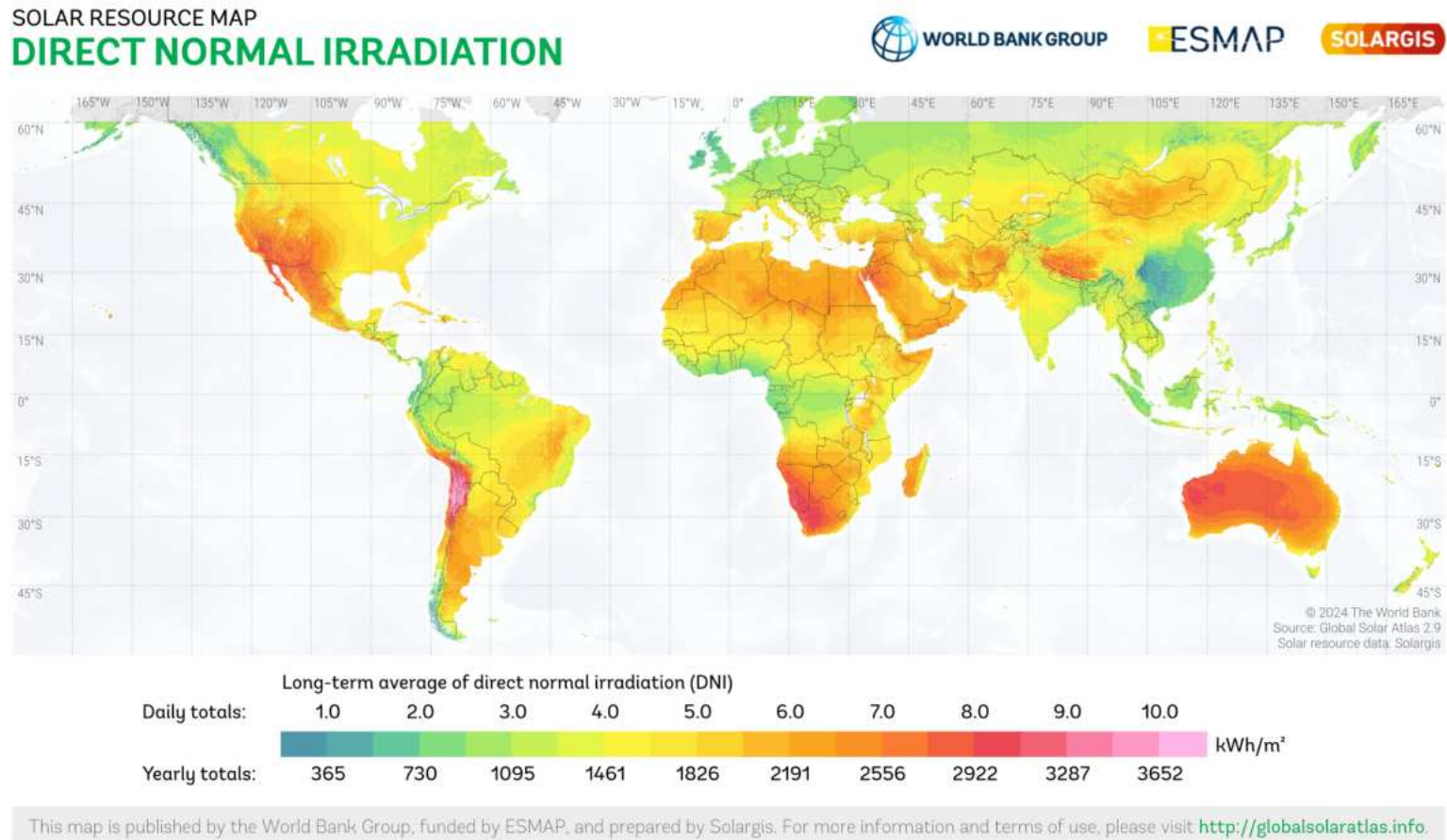


Abbildung 1.2.: Jahresdurchschnitt der direkten Normalstrahlung, engl. Direct Normal Irradiation (DNI) [Sol24a].

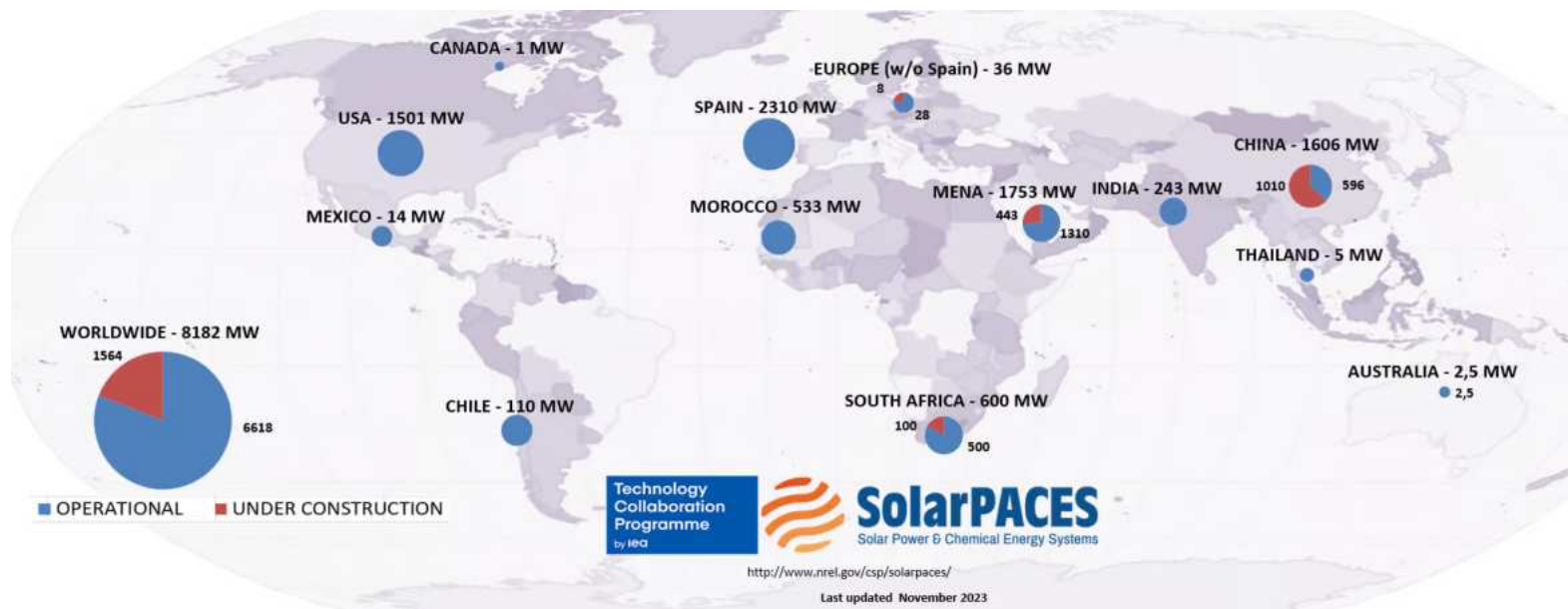


Abbildung 1.3.: CSP Projekte global, in Betrieb und geplante Anlagen in Megawatt, Stand: November 2023 [NRE23].

1. Einleitung



Abbildung 1.4.: Solarturmkraftwerk PS10 (10 MW, vorne) und sich im Bau befindliche Anlage PS20 (20 MW) in der Nähe von Sevilla, Spanien (Aufnahme von 2007) [Koz24].

1.3. Stand der Technik

1.3.1. Existierende Anlagen und Ausbauziele

Abbildung 1.3 zeigt eine Karte mit existierenden und geplanten CSP Anlagen in Megawatt. Es ist erkennbar, dass in westlichen Industrienationen in der Vergangenheit viel in CSP investiert wurde, momentan jedoch kein Ausbau der Kraftwerkskapazitäten geplant ist. Der größte Zuwachs liegt in China gefolgt von der MENA Region und Südafrika, Stand November 2023. Indien ist als potentieller Markt und Investitionstreiber hervorzuheben, da mit der im Frühjahr 2024 beschlossenen Strategie zum Ausbau erneuerbarer Energien 50 % des Energiebedarfs in Zukunft durch CSP gedeckt werden soll [Kra03].

Exemplarisch zeigen die Abbildungen 1.4 bis 1.6 existierende Solarturmkraftwerke. Abbildung 1.14 in Abschnitt 1.4 zeigt das Solarfeld sowie die Solartürme des *Instituts für Solarforschung* des DLR in Jülich.

1.3.2. Verschiedene Bauarten von Heliostaten

Heliostaten übernehmen die zentrale Aufgabe, das Sonnenlicht zu bündeln und in einem Punkt zu konzentrieren. Dabei liegt als äußere Belastung hauptsächlich der Wind an. Doch auch Korrosion stellt ein Problem hinsichtlich der



Abbildung 1.5.: Crescent Dunes, Nevada USA, mit einer Leistung von 110 MW – Inbetriebnahme 2015 [Sti14].



Abbildung 1.6.: Pilotanlage des Startups *Synhelion SA* zur Herstellung Solarer Kraftstoffe – Inbetriebnahme 2024, Jülich [Syn24].

1. Einleitung

Lebensdauer dar. Je größer die Spiegelfläche des Heliostaten ist, desto höher ist die Belastung durch den Wind. Ab einer mittleren Windgeschwindigkeit von in der Regel 11 m/s in 10 m Höhe (vom DLR gegeben) wird der Heliostat daher in die sogenannte Sicherheitsstellung gefahren. Das bedeutet, dass sich die Spiegelfläche in einer parallelen Ebene zum Erdboden befindet. Doch auch im Betrieb, bei niedrigeren Windgeschwindigkeiten, wirken teils hohe Kräfte. Zudem wird der Heliostat zum Schwingen angeregt, wodurch Schäden entstehen können.

All diesen Beanspruchungen muss der Heliostat standhalten bei möglichst niedrigen Kosten. Denn aufgrund ihres Einflusses auf die Kraftwerkskosten sind die Heliostaten einem enormen Kostendruck ausgesetzt. Bei dem Versuch die Kosten der Konstruktion zu senken, haben sich verschiedenste Bauarten ergeben. Aktuell haben sich vier verschiedene Bauarten von Heliostaten etabliert, siehe Abbildung 1.7. Darüber hinaus gibt es viele weitere Konstruktionen. Beispielsweise hat sich auch die Firma *google.org* bereits an einem Heliostat-Design versucht, siehe Abbildung 1.8.

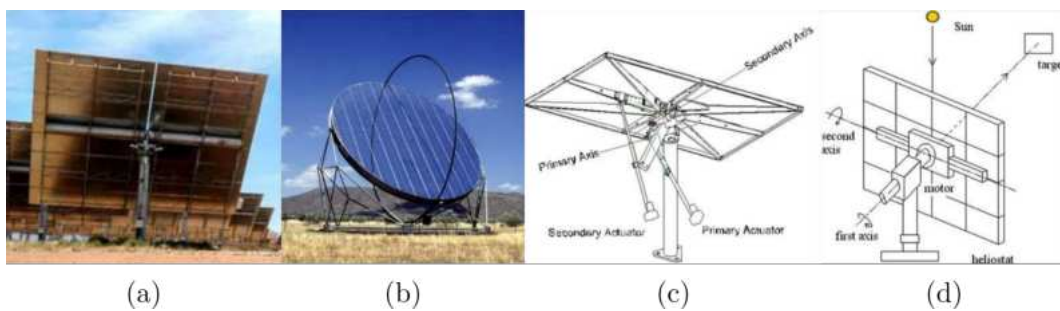


Abbildung 1.7.: (a) T-Type Heliostat, (b) Karussell-Heliostat, (c) Fixed Horizontal Axis Heliostat, (d) Target Alined Heliostat [Pfa+17].

Die verschiedenen Bauarten unterscheiden sich mit Ausnahme des Karussell-Heliostaten hauptsächlich hinsichtlich ihrer Drehachsen. Ihnen ist gemein, dass sie mit einer Pylone am Boden verankert sind. Diese wird in der Regel durch ein Betonfundament fixiert. Der Karussell-Heliostat dagegen liegt mit einer kreisförmigen Lauffläche, welche ein Axiallager bildet, auf dem Boden auf. Durch die Bodennähe der Karussell-Heliostaten in der Sicherheitsstellung sind diese dem Wind weniger ausgeliefert und können je nach Größe mit Erdankern oder ebenfalls auf Betonfundamenten errichtet werden. Die Drehachsen des Karussell-Heliostaten entsprechen denen des T-Heliostaten.

Die Größe der Heliostaten streut stark. In der frühen Phase der Entwicklung standen große Heliostaten mit einer Spiegelfläche von bis zu 150 m² im Fokus der Entwicklung, während heute kleinere Heliostaten mit einer Fläche von 2 bis

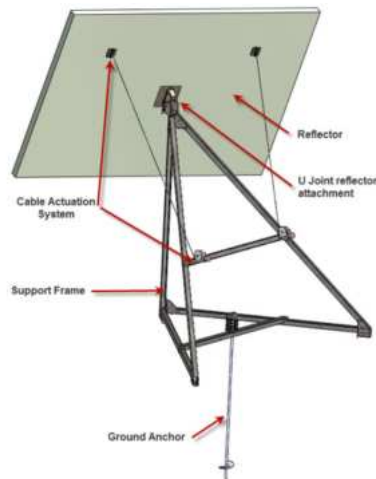


Abbildung 1.8.: Heliostat-Design der Firma *google.org* [All+11].

8 m² bevorzugt werden. Dies hat verschiedene Gründe. Zum einen ist die Effizienz der Heliostaten höher, da der Astigmatismus-Effekt geringer ist, welcher zu einer Unschärfe bei der Fokussierung bei schrägeinfallendem Sonnenlicht führt. Dadurch sinkt die gesamt benötigte Spiegelfläche pro Kraftwerk. Zum anderen nehmen der Aufwand und die Kosten der Konstruktion der Stützstruktur mit steigender Größe überproportional zu, da auch die Windlasten mit steigender Größe überproportional zunehmen. Gleichzeitig haben die Kosten der Steuerungs- und Antriebskomponenten stetig abgenommen. Dies führt dazu, dass kleinere Heliostaten heutzutage allgemein einen Kostenvorteil pro Quadratmeter Spiegelfläche bieten.

1.3.3. Installation von Heliostaten

Heliostaten werden in der Regel vor Ort auf dem Solarfeld montiert. Insbesondere mit steigender Größe der Heliostaten ist dies der Fall. Um die Kosten zu senken, wird eine Serienfertigung bzw. fabrikseitige Montage angestrebt, was für kleinere Heliostaten weitergehend möglich ist. Allerdings ist die Größe komplett montierten Heliostaten, selbst bei kleinsten Modellen, ein Problem für den kosteneffizienten Transport in Überseecontainern. Dies führt dazu, dass lediglich einzelne Baugruppen vormontiert werden können, die dann vor Ort neben der Baustelle oder bei der Installation im Feld endmontiert werden müssen. Ein Beispiel für die Endmontage der Spiegelfacetten auf der Stützstruktur durch die Firma *BrightSource Energy, Inc.* ist in Abbildung 1.9 zu sehen. Auch für das Heliostat-Design des DLR, siehe Abschnitt 1.5, ist die Vormontage in der Fabrik und die Endmontage neben dem Solarfeld ein realistisches Szenario.

1. Einleitung

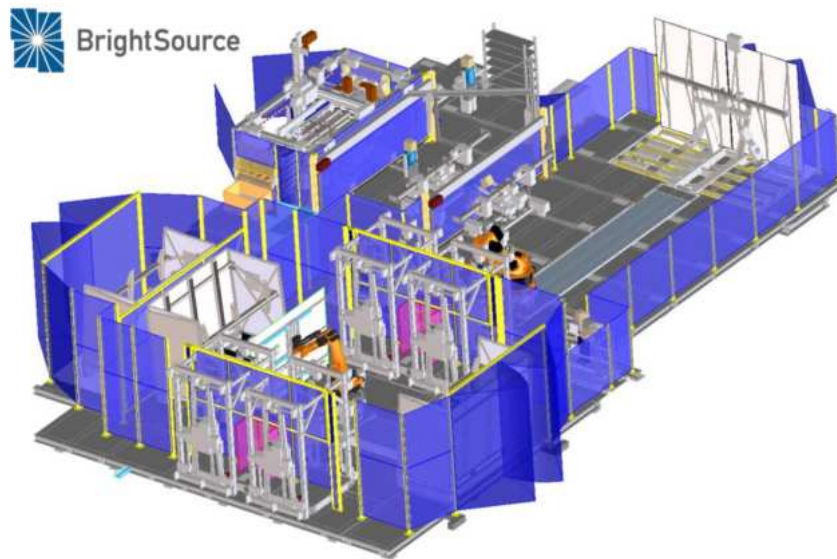


Abbildung 1.9.: Mobile Montagelinie der Firma *BrightSource Energy, Inc.* zur Endmontage der Heliostaten vor Ort [Toi14].

Um den Heliostaten schließlich fest im Boden zu verankern, werden häufig klassische Fundamente verwendet. Bei größeren Heliostaten werden grundsätzlich Betonfundamente gegossen. Bei kleineren Modellen kommen eher Erdanker zum Einsatz. Aber auch andere Konzepte wurden bereits erprobt. Schwere Sockel (Abbildung 1.10), das Verbinden der Heliostaten untereinander zu einer großen Rahmenkonstruktion, welche durch ihr Eigengewicht und der hohen Auflagefläche den Windlasten trotzt, oder Einbringen von Pfählen sind einige Beispiele hierfür. Letztere wurde beispielsweise beim Bau des *Ivanpah Solar Electric Generating System* Solarturmkraftwerk (Kalifornien) durch die Firma *BrightSource Energy, Inc.* angewendet, siehe Abbildung 1.11 [For13].



Abbildung 1.10.: Ablegen eines Heliostaten mit Sockelfundament durch ein autonomes Fahrzeug der Firma *Heliogen, Inc.* [Hel23].



Abbildung 1.11.: Vibrationsrahmen der Pylonen der Heliostaten des *Ivanpah Solar Electric Generating System* durch die Firma *BrightSource Energy, Inc.* [For13].

1.4. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Das Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) ist ein eingetragener Verein, welcher durch die Bundesrepublik Deutschland durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und das Bundesministerium der Verteidigung (BMVg) finanziert wird. Weitere Mittel bezieht das DLR durch die Bundesländer sowie der Industrie und andere Förderprogramme. Das DLR ist sowohl als deutsche Raumfahrtagentur sowie als Forschungs- und Technologiezentrum mit den Schwerpunkten Luft- und Raumfahrt, Energie und Verkehr, sowie Sicherheits- und Verteidigungsforschung tätig. Dabei umfasst das DLR 54 Institute an 30 Standorten in Deutschland und darüber hinaus Büros in Brüssel, Paris, Tokio und Washington D.C. [DLR24b]

Das DLR zeichnet sich durch eine enge Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Industrie aus und ist gleichzeitig das größte nationale Forschungszentrum für Luft- und Raumfahrt Europas [VD23].

1.4.1. Institut für Solarforschung

Das Institut für Solarforschung wurde 2011 gegründet und ist aus dem Institut für Technische Thermodynamik hervorgegangen. Es ist die führende deutsche Forschungseinrichtung für konzentrierende Solartechnologie im Bereich Elektrizität, Prozesswärme und Kraftstoffe. Das Institut umfasst vier Standorte mit 120 Mitarbeitern in Köln, Stuttgart und Jülich sowie in Almería, Spanien. Seit 2011 ist der 2009 fertiggestellte Solarturm Jülich (Abbildung 1.12 und 1.14) in Besitz des DLR – zuvor in Besitz der *Stadtwerke Jülich GmbH* –, welches an diesem diverse Großversuche durchführt. Dabei werden beispielsweise verschiedenste Receiver-Technologien erprobt.

Eine Kurzübersicht über die Entwicklung bzw. Meilensteine des Instituts für Solarforschung zeigt Abbildung 1.13.

1.4. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt



Abbildung 1.12.: Solartürme des Instituts für Solarforschung des DLR [DLR24a].



Abbildung 1.13.: Meilensteine des Instituts für Solarforschung des DLR in Jülich [VD23].

1. Einleitung



Abbildung 1.14.: Solarturm und Multifokusturm des Instituts für Solarforschung in Jülich, Erstinbetriebnahme 2009 [Ben+21].

1.5. Aufgabenstellung & Heliostat-Design des DLR

Am Institut für Solarforschung wird aktuell (Stand 2024) ein Heliostat-Design entwickelt, welches pro Quadratmeter Spiegelfläche über 20 % günstiger ist, als andere verfügbare Modelle. Das Design entspricht dem Aufbau eines T-Heliostaten und ist mit einer 2 m^2 großen Spiegelfläche ein verhältnismäßig kleiner Heliostat. Durch die kleine Spiegelfläche erhöht sich zwar die Effizienz des Heliostaten, insgesamt werden jedoch mehr Heliostaten benötigt, um die gleiche Gesamtspiegelfläche zu erhalten. Dadurch steigen insgesamt auch die Installationskosten.

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Konzept für die Installation des Heliostat-Designs des DLR (Abbildung 1.16) ausgearbeitet werden. Es stellen sich dabei grundlegende Fragen nach der Art des Fundaments und den daraus resultierenden weiteren Prozessschritten, sowie auch nach dem Materialfluss und Prozessablauf im Allgemeinen.

Die Konstruktion und der Prototyp des Designs sind in Abbildung 1.15 und 1.16 zu sehen. Einzelne Details befinden sich noch in der Entwicklung, wie etwa der Antrieb der Azimut-Achse (vertikale Drehachse), und werden daher in dieser Arbeit nicht weiter behandelt. Relevant für diese Ausarbeitung ist dagegen die Pylone des Heliostaten, da diese als Bindeglied zwischen Fundament und Heliostat elementaren Einfluss auf die Installation hat. Die Pylone hat einen Außendurchmesser von 140 mm bei einer Wandstärke von 0,5 mm und besteht aus galvanisch verzinktem Baustahl.

1. Einleitung

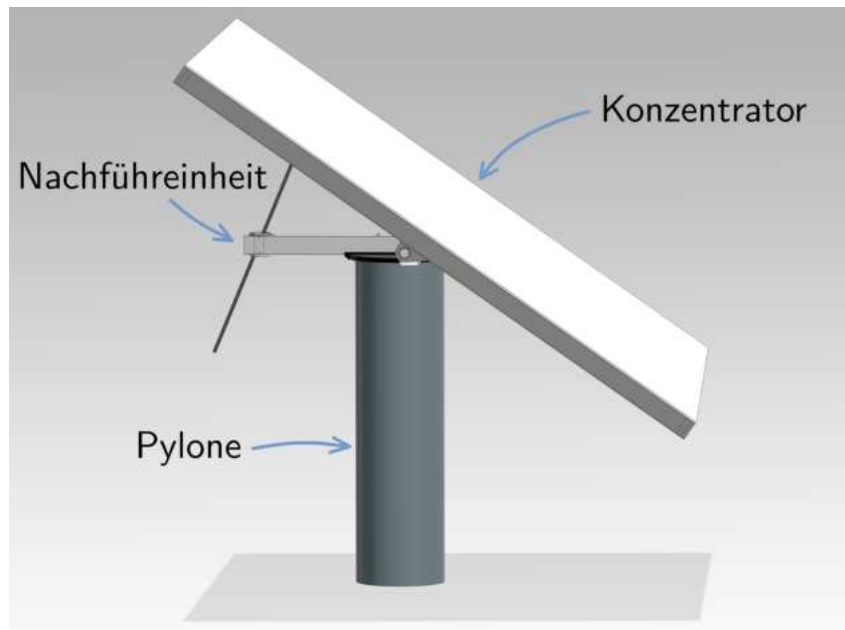


Abbildung 1.15.: Konstruktion des Heliostat-Designs des DLR.

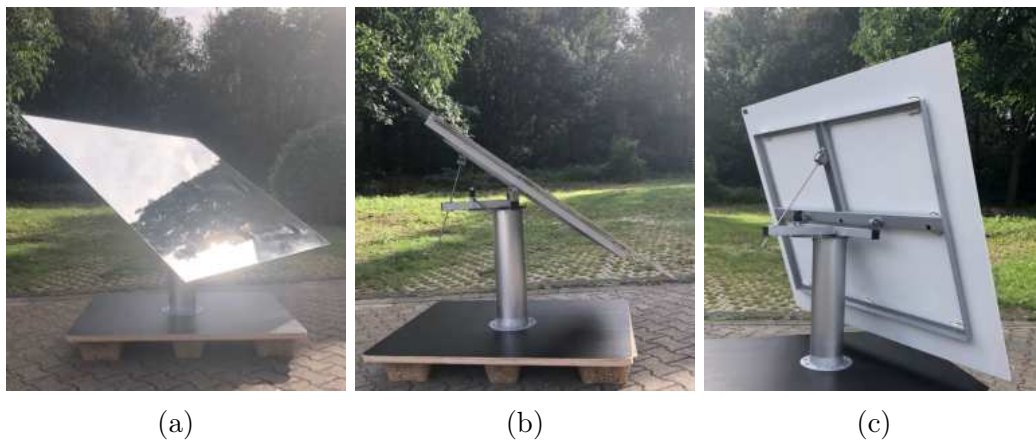


Abbildung 1.16.: Prototyp des Heliostat-Designs des DLR in verschiedenen Ansichten.

2. Entwicklungsmethodik

In diesem Kapitel wird die Herangehensweise zur Lösungsfindung und Bewertung beschrieben. Die Aufgabenstellung wird abstrahiert und eine allgemeine Funktionsstruktur aufgestellt.

2.1. Vorgehensweise

Die Vorgehensweise orientiert sich grundsätzlich an der VDI 2221 [Ver19]. In einem ersten Schritt werden die Aufgabenstellung abstrahiert und Anforderungen in Absprache mit dem DLR definiert. Anschließend wird eine Funktionsstruktur erarbeitet. Die Konzeptfindung ist in eine Vorkonzeptionierung, die Konzeptionierung und die Detaillierung unterteilt. Dabei wird die Bandbreite der möglichen Konzepte schrittweise eingegrenzt und der Detailgrad erhöht. Die Anforderungen werden mit jeder Stufe weiter ausgearbeitet. Diese liegen zu Beginn der betreffenden Abschnitte vor.

Die Lösungsfindung erfolgt je Funktion durch die Methodik der Systemanalyse und/oder eigenen Lösungen mit dem Prinzip des morphologischen Kastens. Die Vorauswahl verschiedener Lösungen erfolgt nach einer groben Skala von 0 bis 2, siehe Tabelle 2.1, wobei nur Lösungen übernommen werden, die mit 2 bewertet sind. Detaillierte Bewertungen erfolgen nach dem Ansatz der VDI 2225. Dabei werden die Lösungen nach der Bewertungsskala in Tabelle 2.2 bewertet und anschließend die Wertigkeit nach Gleichung (2.2) berechnet.

In Kapitel 4.4 *Installationsprozess* wird eine wirtschaftliche Abschätzung vorgenommen, um die Konzepte zu bewerten. Die entsprechende Methodik wird in dem zugehörigen Kapitel beschrieben.

Tabelle 2.1.: Grobe Bewertungsskala für Vorauswahl.

Werte	Bedeutung
0	nicht realisierbar
1	nur mit großem Aufwand realisierbar
2	gut realisierbar

2. Entwicklungsmethodik

Tabelle 2.2.: Werteskala nach Richtlinie VDI 2225 [Ver98].

Pkt.	Bedeutung
0	unbefriedigend
1	gerade noch tragbar
2	ausreichend
3	gut
4	sehr gut (ideal)

$$G_{wj} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot w_{ij} \quad (2.1)$$

$$W_j = \frac{G_{wj}}{w_{max} \cdot \sum_{i=1}^n g_i} \quad (2.2)$$

2.2. Anforderungen - Allgemein

Zur Erfüllung der Aufgabenstellung (siehe Abschnitt 1.5 und Anhang A.1) ist ein Fahrzeugkonzept für die automatische Installation eines Heliostaten zu entwickeln. Dabei ist seitens der Aufgabenstellung vorgegeben, dass die Pylone Abbildung 1.15 als Pfahl gerammt wird und in einem zweiten Schritt der Rest des Heliostaten, der Konzentrator und die Nachführeinheit, montiert wird. Bei diesem Lösungsvorschlag handelt es sich gegebenenfalls um eine Vorfixierung, welche es zu überprüfen gilt. Abstrahiert ist es die Aufgabe, den Heliostaten an einer definierten Position im Solarfeld unabhängig von der Art des Fundaments zu installieren. Die Priorität liegt lediglich auf einer möglichst kostengünstigen Installation.

Denkbar ist, dass insbesondere in Gebieten des globalen Sonnengürtels (Gebiete mit hoher DNI) die Lohnkosten so niedrig sind, dass eine vollautomatisierte, möglichst personalreduzierte Installation nicht das Kostenoptimum darstellt. Auch kann es in den betreffenden Ländern politisch gewünscht sein, dass bei Projekten viele Arbeitsplätze entstehen. Da dieser Aspekt schlecht abschätzbar ist bzw. sich im Rahmen dieser Arbeit kaum bewerten lässt, wird in dieser Arbeit eine Lösung mit möglichst hohem Automatisierungsgrad verfolgt.

Neben der generellen Forderung der Entwicklung eines Konzepts zur Senkung der Installationskosten, dürfen durch eventuell notwendige Anpassungen des Heliostaten zur Installation die Fertigungs- und Materialkosten des Heliostaten, wie er in Abbildung 1.15 und 1.16 gezeigt ist, nicht merklich steigen.

Darüber hinaus bestehen Anforderungen hinsichtlich der Toleranz. Auch sind einige Randbedingungen hinsichtlich der Gelände- und Umweltbedingungen gegeben. So wird beispielsweise das Bauland des Solarfeldes als planierte, ebene Fläche angenommen. Dennoch liegen keine straßenähnlichen Bedingungen vor. Es wird von *Off-Highway* gesprochen.

Weiter wird von unbekanntem Baugrundverhältnissen bzw. Bodenverhältnissen potentieller Solarturmkraftwerke ausgegangen, da diese bisher im Detail nicht ausreichend bekannt sind.

Die allgemeinen Anforderungen liegen in Tabelle 2.3. Weitere Anforderungen, die sich aus späteren, im Detailgrad spezifizierten Lösungen ergeben, werden in den jeweiligen Kapiteln aufgeführt und erläutert. Die vollständige Anforderungsliste liegt im Anhang unter Abschnitt A.2 vor.

Tabelle 2.3.: Allgemeine Anforderungen an die Installation eines Solarfeldes (Vollständige Anforderungsliste unter Anhang A.2).

Datum	F/W	Anforderungen	Verantw.
Allgemein			
März '24	F	Ziel: Geringstmögliche Installationskosten pro Heliostat	DLR
März '24	F	Konzeptentwicklung für das Heliostat-Design des DLR (Abbildung 1.15, 1.16)	DLR
März '24	F	Konzeptentwicklung am Beispiel des in Abbildung 4.12 abgebildeten Solarfeldes	DLR
März '24	F	Toleranz für Platzierung des Heliostaten im Feld ± 10 mm	DLR
April '24	F	Winkelabweichung des Heliostaten im Vergleich zur lotrechten Aufstellung $< 5^\circ$	DLR
März '24	F	Optimierung der Heliostat-Konstruktion für den Installationsprozess ohne nennenswerte Fertigungskostensteigerung je Heliostat	DLR
März '24	W	Hoher Automatisierungsgrad	DLR
Gelände- und Umweltbedingungen			
März '24	F	Unbekannte Baugrundverhältnisse/ Universelle Konzeptionierung	L. G.

Fortsetzung...

2. Entwicklungsmethodik

März '24	F	Konzeptionierung für ebene/planierte Fläche ohne Vegetation	DLR
März '24	F	Ohne Berücksichtigung von Wetterbedingungen (Annahme: Installation nur bei günstigen Wetterverhältnissen)	DLR

2.3. Funktionsanalyse

Für die oberste Ebene der Funktionsstruktur, siehe Abbildung 2.1, zur Installation eines Heliostaten bzw. des gesamten Solarfeldes ergeben sich die folgenden Hauptfunktionen:

Transportieren Bauteile des Heliostaten sowie notwendige Maschinen müssen auf dem Solarfeld bewegt werden.

Fixieren Der Heliostat muss ortsfest mit dem Boden verbunden/fixiert werden, so dass alle anliegenden Kräfte vom Boden abgetragen werden können, ohne dass sich die Position des Heliostaten verändert oder seine Funktion eingeschränkt wird.

Navigieren Der Heliostat muss an der richtigen Position/dem Installationsort auf dem Solarfeld mit der geforderten Genauigkeit installiert werden.

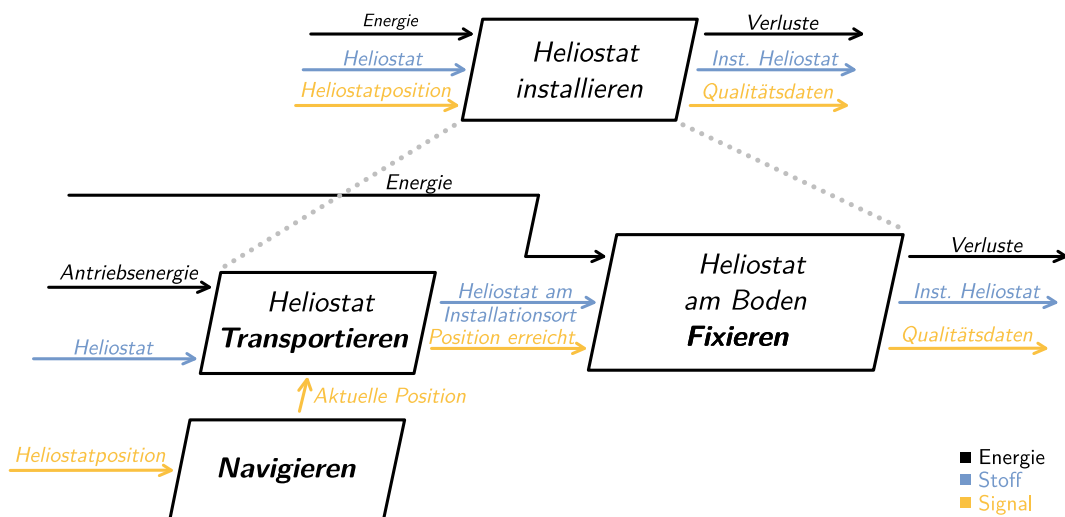


Abbildung 2.1.: Übergeordnete Funktionsstruktur.

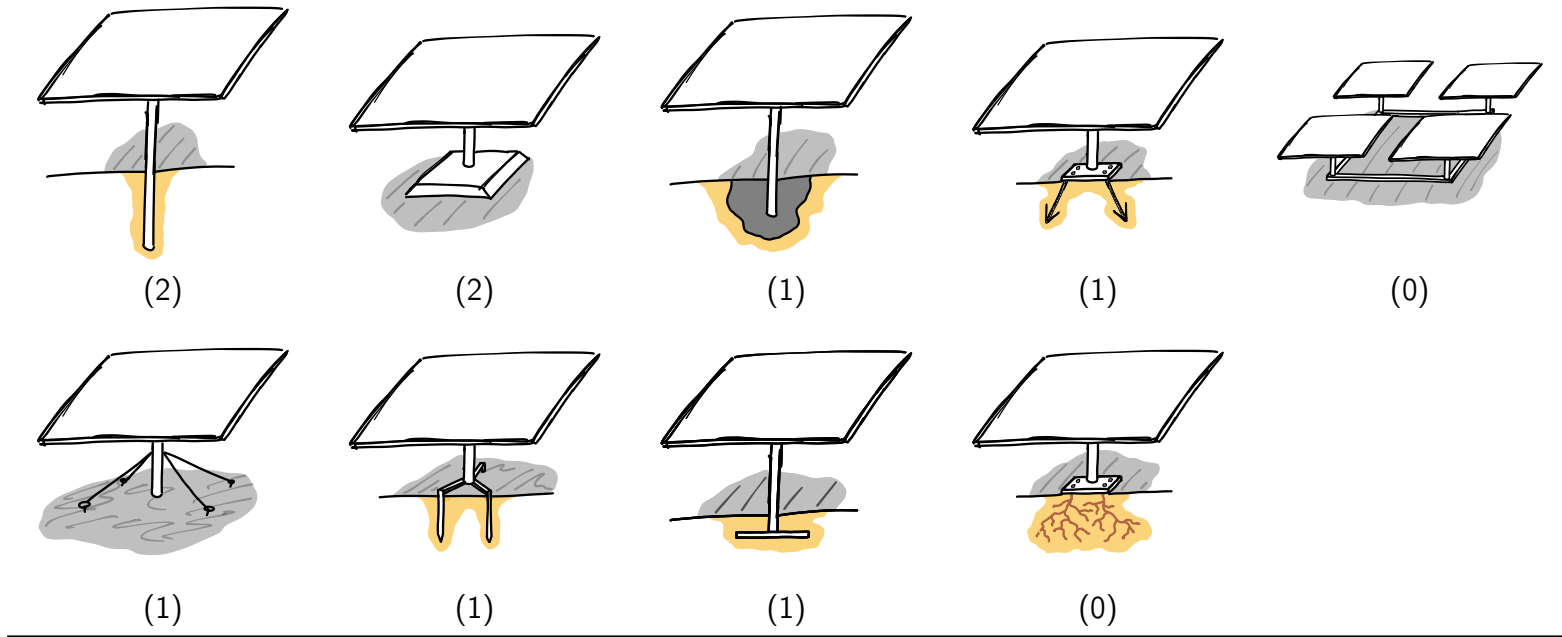
Im nachfolgenden Kapitel 3 wird zunächst die Funktion *Fixieren* thematisiert, da diese maßgeblich für das Gesamtkonzept ist.

3. Vorkonzeptionierung

Aus der übergeordneten Funktionsstruktur gehen drei Hauptfunktionen hervor – *Fixieren*, *Transportieren* und *Navigieren*. Die Funktion *Navigieren* wird nicht direkt durch die Art der Installation bedingt. Welche Maschinen und welches Material hingegen an die richtige Position zu welchem Zeitpunkt transportiert werden muss, ist abhängig von der Art der Fixierung des Heliostaten. Daher ist in einem ersten Schritt die Frage der Funktion *Fixieren* zu klären.

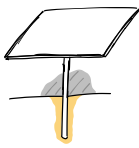
Des Weiteren werden in diesem Kapitel die anliegenden Windlasten berechnet und die Standsicherheit für das ausgewählten Konzept abgeschätzt.

Tabelle 3.1.: Konzepte zum Verbinden der Heliostaten mit dem Boden (Bewertung in Klammern gegeben).



3.1. Konzepte zur Fixierung

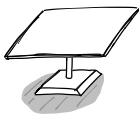
Tabelle 3.1 zeigt verschiedene Konzepte wie die in Abbildung 1.15 abgebildete Konstruktion fixiert bzw. mit dem Boden verbunden werden kann. Es werden auch die bereits angewendeten Methoden der Heliostat-Installation aus Kapitel 1.3 vorgestellt und bewertet. Im Folgenden werden die Konzepte kurz erläutert und nach der Skala von Tabelle 2.1 grob mit 0 bis 2 bewertet. Die vergebene Punktzahl ist der Beschreibung in Klammern vorangestellt. Neben der Realisierbarkeit erfolgt die Bewertung vor dem Hintergrund der vermuteten Kosten und der Automatisierbarkeit.



(2) Dieses Konzept stellt die Referenz gemäß Aufgabenstellung dar. Die Pylone wird verlängert und in den Erdboden eingebracht. Dadurch entstehen zusätzliche Materialkosten. Da jedoch der Fertigungsprozess der Pylone unverändert bleibt und auch keine zusätzlichen Bearbeitungs- oder Fügeprozesse notwendig sind, fallen praktisch keine weiteren Kosten an. Das Konzept stellt daher hinsichtlich der Material- und Fertigungskosten das Optimum dar.

Die Methode des Einbringens ist hier zunächst nicht definiert. Dabei sind unter Umständen schwere Maschinen notwendig, so z.B. beim Pfahlrammen, engl. Pile Driving. Auch könnte die Pylone in diesem Fall sehr wahrscheinlich nur ohne den Konzentrator gerammt werden, so dass dieser nachträglich montiert werden müsste. Die höheren Investitionskosten für die Maschinen relativieren sich über die hohe Stückzahl der Heliostaten.

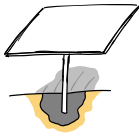
Dieses Konzept entspricht dem Lösungsvorschlag der Aufgabenstellung. Das Konzept wurde bereits angewendet, siehe Kapitel 1.3 und ist daher wahrscheinlich auch für das Heliostat-Design des DLR realisierbar. Dies wird als vorteilhaft angesehen.



(2) Eine einfache Art der Installation ist das Aufstellen des Heliostaten mit einem Sockel. Der Heliostat wird an dem Sockel vormontiert und im Gesamten an der richtigen Position abgelegt. Dafür sind keine speziellen Maschinen notwendig. Der Materialverbrauch ist jedoch höher und die Fertigung aufwendiger. Durch die Fertigung in Serie reduzieren sich zwar die Stückkosten, jedoch erhöhen sich die Transportkosten. Dennoch bietet sich die Lösung gerade für kleinere Heliostaten an und sie ist gut automatisiert umzusetzen. Die Investitionskosten für Maschinen zur Installation sind voraussichtlich sehr niedrig. Je nach Beschaffenheit des Sockels und der tatsächlichen Stückkosten könnte sich

3. Vorkonzeptionierung

diese Lösung als sinnvoll erweisen.



(1) Sehr bewährt ist ein klassisches Betonfundament mit Ort beton, bei dem die Pylone eingegossen oder verschraubt wird. Beton als Rohstoff ist sehr günstig, allerdings ist das Materialhandling aufwendig. Maschinen zur Verarbeitung von Ort beton müssen aufwendig gereinigt werden, um für den Transport vorbereitet zu werden. Da eine autonome Maschine eine Sonderanfertigung mit entsprechenden Investitionskosten wäre, würde diese nur einmalig gebaut werden und müsste für verschiedene Baustellen häufig transportiert werden. Gleichzeitig muss der Heliostat fixiert werden, während der Beton aushärtet. Sollte der Heliostat mit dem Fundament verschraubt werden, fällt ein weiterer Prozessschritt an. Zudem entstehen in diesem Fall weitere Kosten durch den Flansch am Fuß der Pylone und die Schrauben. Dennoch ist die Lösung grundsätzlich realisierbar.



(1) Erdanker finden bereits Verwendung bei einigen Heliostat-Designs, so z.B. bei dem der Firma *google.org* (Abbildung 1.8). Eine Variante sind Verschraubungen mit großem Gewinde, so dass diese in die Erde geschraubt werden können. Die Pylone muss daher am Fuß über einen entsprechend großen Flansch verfügen, durch den die Erdanker in die Erde eingeschraubt werden können. Der Flansch und die Erdanker erhöhen die Materialkosten im Vergleich zum Referenzkonzept deutlich. Zudem entstehen auch Fertigungskosten durch das Fügen von Pylone und Flansch. Die Automatisierung des Installationsprozesses ist dagegen gut gegeben. So könnten die Erdanker am Heliostaten z.B. vormontiert sein, so dass diese nur noch in den Erdboden geschraubt werden müssten.



(0) Verbindet man mehrere Heliostaten mit einem Rahmen, stützen diese sich gegenseitig. Durch das höhere Eigengewicht und der breiten Auflagefläche des Verbunds können die Windlasten abgetragen werden. Nachteilig ist, dass jeder Rahmenverbund mehr oder weniger individuell sein müsste, da die Abstände der Heliostaten im Solarfeld nicht konstant sind. Materialkosten und Fertigungskosten fallen höher aus und auch der Transport gestaltet sich aufwendig.



(1) Die Pylone wird leicht in den Boden eingedrückt und/oder beispielsweise mit einer Spitze versehen. Dann werden, wie bei einem Zelt, Seile gespannt, um den Heliostaten zu installieren. Durch das Spannen der Seile mit kleinen Erdankern oder Heringen wird der Heliostat fixiert. Mit größerem Abstand der Erdanker zur Pylone ist der Winkel der Seile flacher, wodurch die horizontal wirkenden Windlasten besser abgetragen werden können. Die Erdanker können in diesem Fall deutlich kleiner dimensioniert sein, wodurch Kosten reduziert werden. Vertikale Lasten werden vom Eigengewicht mit kompensiert und sind entsprechend weniger kritisch. Insbesondere die automatische Installation ist möglicherweise aufwendiger als bei anderen Konzepten, da die Seile gespannt und befestigt werden müssen. Stahlseile, Verankerung und Ösen am Heliostaten erhöhen zudem die Stückkosten. Der Transport mit den Seilen birgt zu dem die Gefahr, dass sich die Seile ungewollt ineinander verfangen, so dass dem konstruktiv vorgebeugt werden muss.



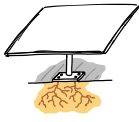
(1) Statt einer einzelnen Pylone werden mehrere Stahlprofile einer Struktur voneinander beabstandet in die Erde eingebracht. Dadurch wird eine zusätzliche Standfläche aufgespannt, so dass die Stahlprofile jeweils klein ausfallen können im Vergleich zur Querschnittsfläche einer einzelnen Pylone. Die Struktur muss jedoch gefertigt und mit der Pylone verbunden werden, beispielsweise durch Schweißen. Die Pylone erhält ihre Stabilität aus der Rohrgeometrie. Die Stahlprofile können zwar kürzer ausfallen, müssten für die gleiche Stabilität der Pylone jedoch massiver ausgeführt werden. Zusammen mit den erhöhten Fertigungskosten ist anzunehmen, dass dieses Konzept teurer als die Referenzstruktur ist.



(1) In diesem Konzept wird am Fuß der Pylone eine Ankerstruktur angebracht, z.B. durch Schweißen. Anschließend wird die Konstruktion in einer zuvor ausgehobenen Grube platziert, wieder mit Erdboden bedeckt und verdichtet, ähnlich wie beim Einpflanzen einer Pflanze. Dieses Konzept erscheint nicht sinnvoll. Zwar kann der Heliostat komplett vormontiert ins Feld transportiert werden, jedoch muss in einem ersten Prozessschritt die Grube ausgehoben werden. Dann wird der Heliostat platziert und in einem weiteren Prozessschritt wieder mit Erdboden bedeckt. Zudem entstehen Material und Fertigungskosten durch das Anbringen der Ankerstruktur. Das Prinzip bietet gegenüber

3. Vorkonzeptionierung

der Referenz daher keine erkennbaren Vorteile, auch wenn es grundsätzlich realisierbar ist.



(0) Bei dieser Idee wird eine kleine, am Fuß der Pylone angebrachte Grundplatte mit Wurzeln im Erdboden verankert. Da Pflanzen jedoch lange zum Wachsen benötigen, könnten künstliche Wurzeln z.B. durch das Einbringen eines schnell aushärtenden Epoxidharzes geschaffen werden. So kann durch Löcher in der Grundplatte das Epoxidharz in den Boden gepresst werden, welches sich daraufhin durch die Kapillarwirkung im Boden verästelt und nach dem Aushärten einen Formschluss erzeugt. Das Konzept ist innovativ und je nach Beschaffenheit des Bodens wahrscheinlich realisierbar. Das technologische Risiko ist allerdings hoch. Eine Qualitätskontrolle ist beispielsweise schwierig, so dass keine Aussage darüber getroffen werden kann, ob sich die „Wurzel“ ausreichend ausgebildet haben. Auch Annahmen zur Lebensdauer und Schwingfestigkeit sind schwierig zu treffen und müssten durch Vorversuche abgeschätzt werden. Zudem ist Epoxidharz nicht günstig und selbst schnell aushärtende Harze erhöhen wahrscheinlich die Taktzeit, da der Heliostat über diese Zeit in Position gehalten werden muss. Der Erdboden verbindet sich zudem mit dem Epoxidharz und kann kaum wieder von diesem getrennt werden, wodurch der ungünstige Umwelteinfluss gegenüber anderen Konzepten erhöht ist.

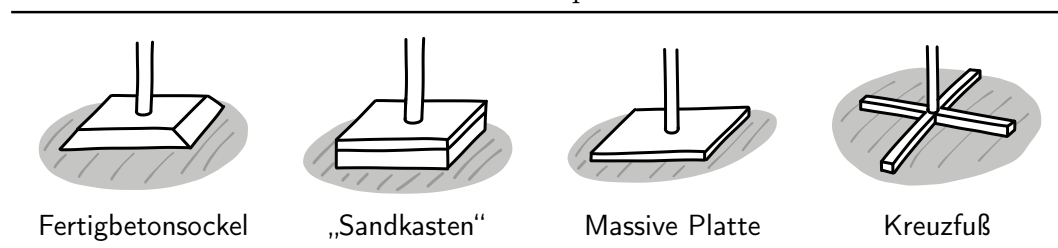
Somit ergeben sich zwei realistische Konzepte, welche sich auch mit dem Stand der Technik decken. Dabei stehen sich beide Konzepte gegenüber. Überzeugt der Sockel durch eine einfache Installation und demnach geringe Investitionen in die notwendigen Maschinen zur Installation des Solarfeldes, sind dagegen die Materialkosten pro Heliostaten höher. Das Verlängern der Pylone und dessen direktes Einbringen in den Boden besticht im Gegensatz dazu durch äußerst geringe Materialkosten und keine weiteren Kosten für die Fertigung. Jedoch sind die Investitionskosten für die Maschinen zur Installation voraussichtlich kostenintensiv. Da sich mit steigender Stückzahl die höheren Investitionskosten voraussichtlich relativieren, entsteht für das Konzept des Pfahlfundaments langfristig ein Kostenvorteil pro Heliostat.

Um die Konzepte final gegeneinander abzuwägen, werden weitere Ausgestaltungen des Sockels entwickelt, siehe Abschnitt 3.2, und mit der Pfahlgründung verglichen.

3.2. Konzept: Sockel

Ein schwerer Standfuß wird vormontiert mit dem Heliostaten auf ein Fahrzeug geladen und im Feld platziert. Der Installationsprozess ist einfach. Jedoch erhöhen sich die Stückkosten des Heliostaten durch den erhöhten Materialeinsatz gegenüber dem Konzept des Pfahlfundaments. Tabelle 3.2 zeigt verschiedene Konzepte der Gestaltung eines Sockels. Am vielversprechendsten sind dabei die Konzepte *Fertigbetonsockel* und „*Sandkasten*“. Fertigbeton weist geringe Materialkosten und eine hohe Qualität auf. Im Falle des „*Sandkastens*“ werden Materialkosten und Transportkosten eingespart, in dem ein Hohlkörper vor Ort mit Erdboden bzw. Sand befüllt wird. Es ist anzunehmen, dass die *Massive Platte* und der *Kreuzfuß* durch die vergleichsweise hohen Materialkosten von Stahl nicht sinnvoll sind. Die Konzepte *Fertigbetonsockel* und „*Sandkasten*“ werden im Folgenden genauer diskutiert.

Tabelle 3.2.: Verschiedene Konzepte eines Sockelfundaments.



Fertigbetonsockel Ein Fertigbetonteil als Sockel ist äußerst kostengünstig, da der Rohstoffpreis für Beton in Deutschland (Stand 2024) mit 65 bis 70 €/m³ [Lan23] äußerst niedrig ist. Exemplarisch umgerechnet auf einen kubischen Sockel mit den Maßen 600 mm mal 600 mm mal 50 mm ergibt sich ein Stückpreis pro Sockel von 1,40 €. Zum Vergleich, eine Stahlplatte mit den selben Maßen kostet bei einem Stahlpreis von ca. 620 €/t [Jan24] ca. 88 €. Erhöht dürften zudem die Transportkosten aufgrund des hohen Gewichtes ausfallen. Zudem müsste die Endmontage aufgrund der sperrigen Abmaße der Gesamtkonstruktion vor Ort stattfinden, um die Frachtkosten per Schiff oder LKW in einem ISO-Container zu minimieren, wie unter Kapitel 1.3 beschrieben. Die Kosten dieser Endmontage sind zwar bei allen Konzepten gegeben, gegenüber dem Pfahlkonzept ist jedoch ein weiterer Montageschritt notwendig – der zwischen Pylone und Sockel. Diese Kosten entstehen also zusätzlich.

„**Sandkasten**“ Eine vielversprechende Idee ist ein Kasten mit Aufnahme für den Heliostaten, welcher mit Erde bzw. Sand oder Steinen vor Ort be-

3. Vorkonzeptionierung

füllt wird, um das notwendige Gewicht für die Kippsicherheit zu erreichen. Entsprechende Ideen für einen solchen Sockel als Kunststoffspritzgussteil, beispielsweise aus Rezyklat, sind in Abbildung 3.1 abgebildet. Aber auch Blech- oder Holzkonstruktionen wären denkbar. Grundsätzlich weisen diese Konzepte höhere Materialkosten auf. Sowohl eine Stahl- als auch eine Kunststoff- oder Holzkonstruktion wären kostenintensiver als die Verlängerung der Pylone. Die Problematik der Endmontage wie beim Betonsockel bleibt bestehen. Die Transportkosten sind gegenüber dem Fertigbetonsockel vermutlich geringer. Dafür würde das Füllen des Sockels als weiterer Bearbeitungsschritt vor Ort hinzukommen, wodurch die Kosten bei diesem Konzept steigen.

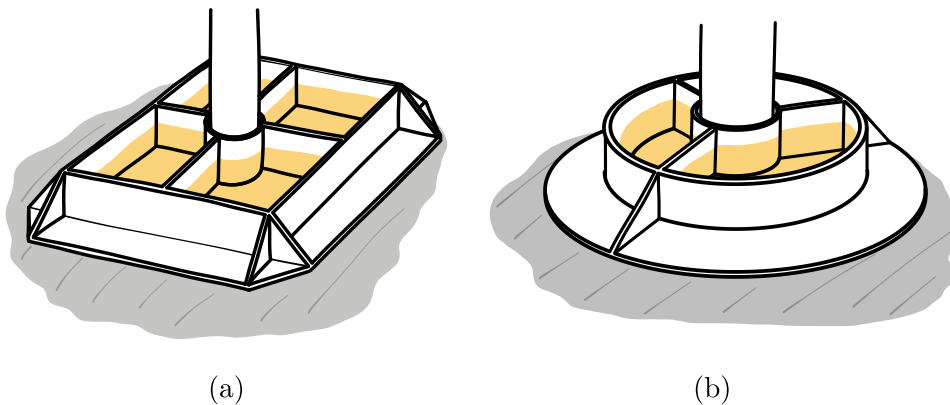


Abbildung 3.1.: Exemplarische Darstellung des Konzepts *Sockel* als Spritzgussteil mit vor Ort verfülltem Erdboden.

Zusammenfassend kann also mit großer Sicherheit davon ausgegangen werden, dass zwar die Installation einfacher wäre und entsprechende Maschinen kostengünstiger in der Anschaffung wären, sich jedoch die Material- und/oder Fertigungskosten je Heliostat voraussichtlich merklich erhöhen würden. Da sich der Einfluss der Investitionskosten der Installationsmaschinen auf die Kosten pro Stück mit der Anzahl der errichteten Heliostaten relativiert, die Materialkosten jedoch proportional mit der Anzahl der Heliostaten steigen, unterliegt das Konzept Sockel hinsichtlich der Kosten.

Als Ergebnis der Vorkonzeptionierung wird demnach, auch im Einklang mit der ursprünglichen Aufgabenstellung (Anhang A.1), das Konzept der Pylone als Pfahlgründung ausgewählt. Im Folgenden wird geprüft, ob dieses Konzept für das betrachtete Heliostat-Design anwendbar ist.

3.3. Konzept: Pylone als Pfahlfundament

Der verlängerte Teil der Pylone wird als Pfahl in den Erdboden eingebracht, wobei es sich um eine Pfahlgründung handelt. Normen für diese Art des Fundaments aus dem Bauwesen sind aufgrund des dafür unüblichen Anwendungsfalls nicht anwendbar. Dies liegt an den Abmaße der Pylone, der Tiefe der Pfahlgründung und den anliegenden Lasten. Dennoch soll in diesem Kapitel eine Abschätzung erfolgen, ob die Pylone als Pfahl grundsätzlich die erforderlichen Lasten abtragen kann. Da für diese Abschätzung die Bodenverhältnisse von elementar Bedeutung sind, diese jedoch nicht vorliegen, wird eine Worst-Case-Abschätzung durchgeführt. Hierzu werden die Minima der im Standardwerk *EA-Pfähle* [Kem12] gegebenen Erfahrungswerte für die Bodenfestigkeit verwendet. Zuvor werden die anliegenden mittleren Windlasten bestimmt.

3.3.1. Bestimmung der äußeren Belastung

Die Windlast, welche am Heliostat anliegt, ist neben dem Eigengewicht der Konstruktion die dominierende Belastung. Sie ist dynamisch, da nicht nur der Wind wechselhaft vorliegt, sondern auch verschiedene Verwirbelungen an der Konstruktion zu dynamischen Belastungen insbesondere auf der Spiegelfläche führen. Entsprechend lange werden die Windlasten bereits an Heliostaten untersucht. Durch Windkanal- und Freifeldversuche, sowie Simulationen liegen dabei abgeleitete Korrelationen vor, um die maximalen Lasten in Abhängigkeit verschiedener Geometrieparameter für verschiedene Heliostaten abzuschätzen. Für diese Arbeit werden die Lasten nach Pfahl et al. "*Determination of wind Loads on Heliostats, 2011*" [PBZ11] bestimmt.

Hervorgerufen durch den Wind, liegen am Heliostaten sowohl Kräfte in allen Raumrichtungen sowie Momente um verschiedene Achsen an, veranschaulicht in Abbildung 3.2. Relevant für die Bestimmung der Tragfähigkeit des Pfahls sind die axialen Pfahllasten in vertikaler Richtung (Z-Achse), sowie die maximale Last in horizontaler Richtung (XY-Ebene), vergl. Abbildung 3.2. Auch von Interesse ist das Drehmoment um die Z-Achse, da dies zu einer Verdrehung des Heliostaten führen könnte.

Die Kräfte und Momente lassen sich nach Gleichung (3.1) und 3.2 bestimmen, mit der Dichte von Luft bei 20°C $\rho = 1,229\text{kg/m}^3$, der Spiegelfläche A des Heliostaten sowie der Windgeschwindigkeit v und den gegebenen Koeffizienten c_{Fi} , c_{Mi} , $d_{ra,Fi}$ und $d_{ra,Mi}$ mit $i = x, y$ oder z .

3. Vorkonzeptionierung

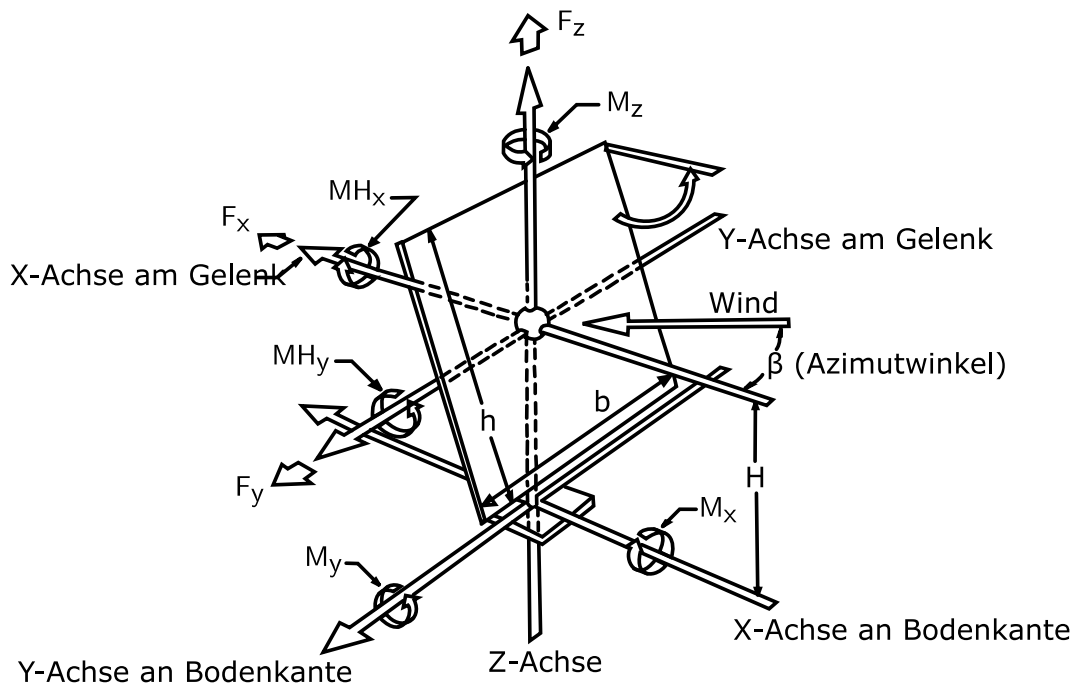


Abbildung 3.2.: Veranschaulichung der anliegende Windlasten, nach [PBZ11].

$$F_{i,ra} = c_{Fi} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot A \cdot d_{ra,Fi} \quad (3.1)$$

$$M_{i,ra} = c_{Mi} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot A \cdot d_{ra,Mi} \quad (3.2)$$

Die Koeffizienten c_{Fi} , c_{Mi} , $d_{ra,Fi}$ und $d_{ra,Mi}$ liegen in Tabelle 3.4 [PBZ11], die Geometrieparameter in Tabelle 3.5 vor. Die Windgeschwindigkeit wird für die verschiedenen Lastfälle unterschieden. Zudem liegen die seitens des DLR vorgegeben Windgeschwindigkeiten in der Höhe H_0 an und müssen auf die Höhe H des Heliostaten gemäß Gleichung (3.3) umgerechnet werden, mit dem gegebenen Exponenten $n = 0,15$ [PBZ11]. Die Werte der einzelnen Windgeschwindigkeiten (gegeben vom DLR) für die verschiedenen Lastfälle liegen in Tabelle 3.3 vor.

$$V = V_{H_0} \cdot \left(\frac{H}{H_0} \right)^n \quad (3.3)$$

Die maximale horizontale Windkraft liegt in X-Richtung mit 262,4 N bei Lastfall 4, also der Sicherheitsstellung (Spiegelfläche parallel zum Erdboden), vor. In vertikaler Richtung (Z-Achse) tritt die höchste Windkraft ebenfalls bei

3.3. Konzept: Pylone als Pfahlfundament

Tabelle 3.3.: Windgeschwindigkeiten der einzelnen Lastfälle gegeben durch das DLR sowie Ergebnisse der Umrechnung nach Gleichung (3.3).

Lastfall	v_{H_0}	v		Beschreibung
1, 2, 3	11	7,4	m/s	Betrieb
4, 5	27	18,1	m/s	Sicherheitsstellung

Tabelle 3.4.: Spitzenwindlastkoeffizienten für das Seitenverhältnis $r_a = 1$ und Abhängigkeiten vom Seitenverhältnis (ohne Einfluss des Windprofils) [PBZ11].

Lastfall	α	β	Windk.	$c_{Fi,r_a=1}$	$d_{r_a,Fi}$	Windm.	$c_{Mi,r_a=1}$	$d_{r_a,Mi}$
1	90°	0°	F_x	3,3	$1/r_a^{0,2}$	M_y	3,2	$H/r_a^{0,2}$
2	30°	0°	F_x	1,6	$1/r_a^{0,1}$	M_{H_y}	-0,53	$H/r_a^{0,2}$
2	30°	0°	F_z	-2,1	$1/r_a^{0,1}$		-	h
3	90°	60°	-			M_z	-0,5	$H/r_a^{0,2}$
4	0°	0°	F_x	0,57	$r_a^{0,6}$	M_{H_y}	$\pm 0,22$	$h/r_a^{0,2}$
4	0°	0°	F_z	$\pm 0,5$	$r_a^{0,4}$	M_y	$\pm 0,69$	$H/r_a^{0,2}$
5	0°	90°	F_y	0,55	$1/r_a^{0,1}$	M_x	$\pm 0,60$	$H/r_a^{0,5}$

Tabelle 3.5.: Geometrieparameter des betrachteten Heliostaten gegeben durch das DLR – vergl. Abbildung 3.2.

Parameter	Formelz.	Wert	Einheit
Spiegelfläche	A	1,92	m ²
Spiegelbreite	b	1,6	m
Spiegelhöhe	h	1,2	m
Achshöhe	H	0,7	m
Seitenverhältnis $\frac{b}{h}$	r_a	1,33	

3. Vorkonzeptionierung

Tabelle 3.6.: Ergebnisse der Windlastberechnung nach Gleichung (3.1) und 3.2 mit den gegebenen Geometrieparametern (Tabelle 3.5).

Lastfall	α	β	Windkraft		Windmoment	
1	90°	0°	F_x	200,29 N	M_y	135,96 Nm
2	30°	0°	F_x	99,95 N	M_{H_y}	-40,89 Nm
2	30°	0°	F_z	-131,18 N		
3	90°	60°			M_z	-51,43 Nm
4	0°	0°	F_x	262,37 N	M_{H_y}	$\pm 108,31$ Nm
4	0°	0°	F_z	$\pm 217,28$ N	M_y	$\pm 198,16$ Nm
5	0°	90°	F_y	206,99 N	M_x	$\pm 187,84$ Nm

Lastfall 4 auf, alterniert jedoch mit $\pm 217,3$ N. Die entstehenden Momente sind ein Resultat der Windkräfte, kombiniert mit den Abmaßen des Heliostaten und sind hauptsächlich für die Konstruktion bzw. Auslegung des Heliostaten selbst relevant. Die Befestigung des Pfahls im Erdboden entspricht im Modell einem federgelagerten Balken, nicht einer festen Einspannung. Der Erdboden kann in diesem Modell kein direktes Biegemoment aufnehmen, sondern nur Druckkräfte, welche sich entlang der Pfahlachse im Boden verteilen. Es müssen daher die Kräfte und nicht die resultierenden Momente betrachtet werden. Eine Ausnahme bildet das Drehmoment um die Z-Achse. Das betragsmäßige Maximum entspricht hier 51,4 Nm. Dies entspricht einer tangentialen Kraft an der Mantelfläche von 734,3 N.

Der Pfahl muss folglich die genannten Kräfte und das Drehmoment abtragen. Dies wird im nachfolgenden Abschnitt überprüft.

3.3.2. Bestimmung der Tragfähigkeit des Pfahls

Die Tragfähigkeit eines Pfahls teilt sich in die axiale und die horizontale Tragfähigkeit. Die maximale axiale Traglast setzt sich dabei aus der Mantelreibung und dem Pfahlfußwiderstand zusammen, siehe Abbildung 3.3.

Der Pfahlmantelwiderstand $Q_m(s)$ ergibt sich nach Gleichung (3.4) mit der äußeren Mantelfläche A_m und der Mantelreibung $\tau_m(s)$ [Kol19].

$$Q_m(s) = A_m \cdot \tau_m(s) \quad (3.4)$$

Die Mantelfläche des Pfahls ergibt sich nach Gleichung (3.5) mit dem Außendurchmesser d_a und der eingebundenen Pfahllänge l .

3.3. Konzept: Pylone als Pfahlfundament

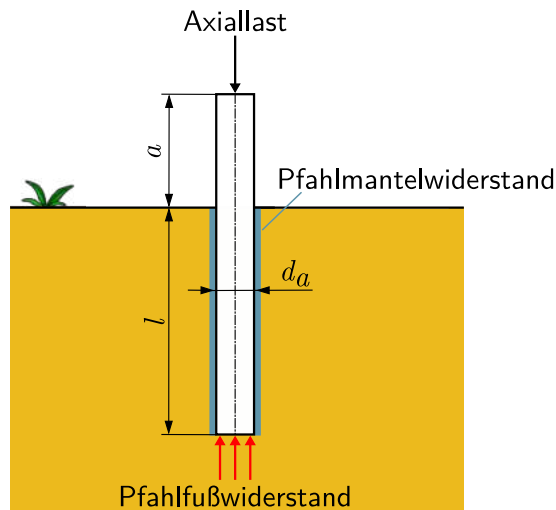


Abbildung 3.3.: Zusammensetzung der axialen Tragfähigkeit eines Pfahls.

$$A_m = \pi d_a l \quad (3.5)$$

Der Pfahlfußwiderstand $Q_s(s)$ ergibt sich nach Gleichung (3.6) mit der Kreisfläche A_F und dem Pfahlspitzendruck $\sigma_s(s)$. [Kol19].

$$Q_s(s) = A_F \cdot \sigma_s(s) \quad (3.6)$$

Die Pfahlfußfläche ergibt sich als Kreisfläche nach Gleichung (3.7) mit dem Außendurchmesser d_a .

$$A_F = \frac{\pi}{4} d_a^2 \quad (3.7)$$

Die resultierende axiale Traglast ergibt sich durch Addition des Pfahlmantelwiderstands und dem Pfahlfußwiderstand, siehe Gleichung (3.8).

$$Q(s) = Q_m(s) + Q_s(s) \quad (3.8)$$

Die Größe s beschreibt die Setzung. Jedes Bauwerk/jede Konstruktion erfährt durch anliegende Lasten und sein Eigengewicht eine Setzung, wodurch die Bodenwiderstandskräfte zunehmen. Gewöhnlicherweise ist in entsprechenden Normen die maximale Setzung eines Fundaments vorgegeben, um Risse oder

3. Vorkonzeptionierung

andere Schäden an Gebäuden zu vermeiden. In diesem Fall wird die Setzung vernachlässigt, da der Heliostat bei der Inbetriebnahme des Feldes und im Betrieb regelmäßig kalibriert wird. Kleinere Abweichungen durch Setzung werden daher kompensiert. Des Weiteren beeinflusst die Setzung eines Heliostaten die benachbarten Heliostaten nicht. Der Zusammenhang zwischen Setzung und Traglast ist qualitativ in Abbildung 3.4 verdeutlicht. Es ist ersichtlich, dass sich mit steigender Setzung s die Tragfähigkeit des Pfahls Q_s einer Grenzlast annähert.

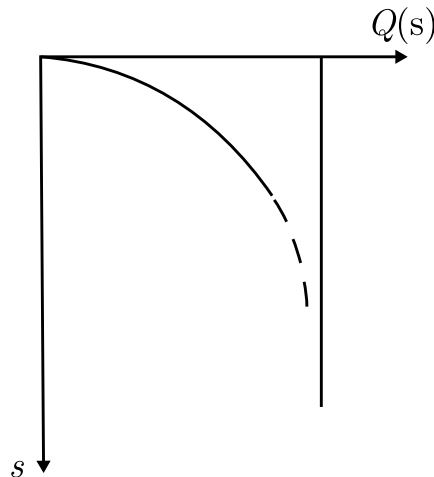


Abbildung 3.4.: Qualitativer Zusammenhang zwischen Setzung s und Traglast $Q(s)$ einer Pfahlgründung [Kol19].

Die horizontale Tragfähigkeit ist schwieriger zu bestimmen und erfordert genaue Bodenkenntnisse, welche nicht vorliegen. Nach dem Bettungsmodulverfahren entspricht ein horizontal belasteter Pfahl einem mit Federn gelagertem Balken. Das Bettungsmodulverfahren ist in Abbildung 3.5 veranschaulicht. Mit dem Anwachsen der Streckenlast $p(x)$ durch die seitliche Verschiebung $x(z)$ wird schließlich ein Grenzwert p_f erreicht. Bei diesem sogenannten Fließdruck fließt der Boden theoretisch um den Pfahl herum, so dass dieser sich aus dem Boden windet. Es können keine weiteren Kräfte mehr abgetragen werden. Die Verteilung des Fließdrucks ist aufgrund der unbekanntenen Bodenverhältnisse nur unzureichend bekannt und variiert über der Tiefe. Dennoch kann dieser nach Gleichung (3.9) mit der Scherfestigkeit des Bodens c_u abgeschätzt werden.

Unter der konservativ vereinfachenden Annahme, dass der Fließdruck über der gesamten eingebundenen Pfahllänge l zeitgleich erreicht wird, kann nach Gleichung (3.12) eine Grenzlast H_g bestimmt werden, welche die Grenze der horizontalen Belastung darstellt. Der an der Geländeoberkante verminderte

3.3. Konzept: Pylone als Pfahlfundament

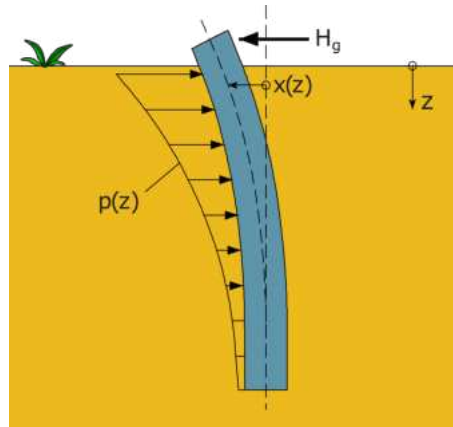


Abbildung 3.5.: Veranschaulichung eines horizontal belasteten Pfahls gemäß dem Bettungsmodulverfahren [Kol89].

Fließdruck sowie der Kraftangriffspunkt a (oberhalb der Geländeoberkante) werden durch den Zusammenhang in Gleichung (3.10) und 3.11 berücksichtigt. Es handelt sich um eine konservative Abschätzung, da in der Realität der Fließdruck nicht zeitgleich überall erreicht wird, da wie Abbildung 3.5 zeigt, die Verschiebung in x mit der Tiefe z abnimmt. Die Maße l und a sind in Abbildung 3.3 veranschaulicht. [Kol19]

$$p_f \approx 10c_u d_a \quad (3.9)$$

$$l' = l - 1,5d_a \quad (3.10)$$

$$a' = a + 1,5d_a \quad (3.11)$$

$$H_g = l' p_f \left(2\sqrt{\left(\frac{a'}{l'}\right)^2 + \frac{a'}{l'} + \frac{1}{2}} - 2\frac{a'}{l'} - 1 \right) \quad (3.12)$$

Da die Bodenverhältnisse unbekannt sind, werden für die Berechnung Erfahrungswerte angewendet. Um eine Worst-Case Abschätzung vorzunehmen, werden die niedrigsten Bodenkennwerte verwendet. Dies entspricht für die Pfahlmantelreibung $\tau_{m,min}$ 20 kN/m² und für die Scherfestigkeit $c_{u,min}$ 60 kN/m², vergl. Tabelle A.1 [Kem12]. Der Pfahlfußwiderstand wird aufgrund des Rohrquerschnitts hier nicht zur Berechnung der Tragfähigkeit mit herangezogen. In der Realität bildet sich häufig ein Pfropfen aus Erdboden im Rohr aus, welcher zur Tragfähigkeit des Pfahls beiträgt. Hiervon wird jedoch im Rahmen der Worst-Case Abschätzung nicht ausgegangen.

Zur Abschätzung der dynamischen Traglast wird ein Vorfaktor von 0,2 mit der statischen Traglast multipliziert [Kol19]. Es ergibt sich das in Abbildung 3.6

3. Vorkonzeptionierung

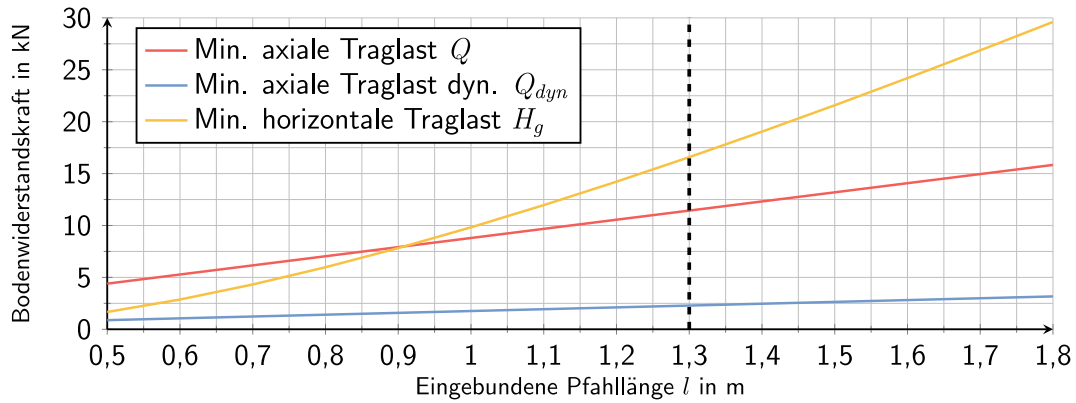


Abbildung 3.6.: Minimale axiale, axial dynamische und horizontale Traglast über der eingebundenen Pfahlänge l .

abgebildete Diagramm. Dargestellt ist die minimale axiale Traglast Q , die minimale dynamische axiale Traglast Q_{dyn} und die minimale horizontale Traglast H_g . Es ist ersichtlich, dass bei einer eingebundenen Länge l von 1,3 m (entspricht einer 2 m langen Pylone) die Traglast die Windlasten weit übersteigt. So liegt die maximale horizontale Last bei 262,4 N und die horizontale Traglast des Pfahls bei 16,59 kN. Es ergibt sich eine Auslastung von 1,6%. Die dynamische axiale Last beträgt $\pm 217,3$ N und die dynamische Traglast beträgt 2,29 kN. Verrechnet mit der Gewichtskraft des Heliostaten (343,4 N), ergibt sich die maximale axiale Last nach unten gerichtet zu 560,6 N, wodurch sich eine Auslastung von 24,5% ergibt. Die tangentielle Kraft resultierend aus dem Drehmoment um die z-Achse liegt bei 734,3 N. Diese Last wird durch die Mantelreibung, also die minimale statische axiale Traglast, abgetragen. Diese beträgt 11,44 kN. Es ergibt sich eine Auslastung von 6,4%. Eine Überlagerung der beiden Kräfte wird daher nicht weiter überprüft.

Die Auslastungen sind extrem klein. Daher kann trotz der Abschätzung davon ausgegangen werden, dass die Tragfähigkeit bzw. Standsicherheit der Pylone bei den anliegenden Lasten auch bei schlechten Bodenverhältnissen gegeben ist. Die Pfahlgründung wird daher als Konzept zur Fixierung für die weitere Konzeptentwicklung übernommen.

4. Konzeptionierung

Die Pfahlgründung als grundlegendes Installationskonzept des Heliostaten erweist sich vor dem Hintergrund der Kosten pro Heliostat als sinnvoll. Auch die Standsicherheit der dünnwandigen Pylone ist nach Abschnitt 3.3 gegeben. Für diese Art des Fundaments wird in diesem Kapitel ein Konzept zur Installation erarbeitet.

Die allgemeine Funktionsstruktur aus Abbildung 2.1 wird spezifiziert, in dem die Funktion *Fixieren* durch die Funktion *Pfahl Einbringen* ersetzt wird. Die weitere Vorgehensweise wird nachfolgend beschrieben.

4.1. Grundüberlegungen

Verschiedene Problemstellungen sind gemäß der Funktionsstruktur zu lösen. Das Vorgehen ist dabei hierarchisch. Die Maschinen zur Erfüllung der primären Funktion des Installierens des Heliostaten sind ausgehend von der technischen Notwendigkeit auszuwählen. Sie beeinflussen wiederum direkt andere Funktionen. Die Trägergeräte bzw. Transportmittel müssen so beschaffen sein, dass die Maschinen transportiert und mit ausreichend Energie versorgt werden können.

Zudem müssen auch die Bauteile transportiert und den Maschinen zugeführt werden. Die Anforderungen an die Transportmittel ergeben sich daher teilweise aus der Maschinenauswahl. Die Transportmittel beeinflussen wiederum die Peripherie. Die Peripherie umfasst Handhabungseinrichtungen, die Gestaltung der Materiallager, Sensorik und anderweitig notwendige Hilfsmittel und ist abhängig von der Art der Transportmittel und der Maschinen.

Dieser Hierarchie folgen nicht nur die Anforderungen, sondern voraussichtlich auch die Kosten des Konzepts. Es ist anzunehmen, dass die Maschinen und die Transportmittel den Hauptteil der Investitions- und Betriebskosten ausmachen. Die Peripherie hat dagegen nur einen geringen Einfluss auf die Kosten.

Dieses Kapitel folgt im Aufbau der beschriebenen Hierarchie. Dementsprechend wird im Folgenden zuerst die Funktion *Pfahl einbringen* thematisiert.

4.2. Einbringen von Pfählen

Bei Pfahlgründungen handelt es sich um eine etablierte Art der Gründung. Entsprechend sind diverse Systeme zum Einbringen von Pfählen in den Erdboden am Markt vorhanden. Im Folgenden wird eine Systemanalyse bestehender Systeme/Produkte vorgenommen, um ein entsprechend den Anforderungen möglichst optimales System zu finden.

4.2.1. Anforderungen – Pylone Einbringen

Von den in Tabelle 2.3 definierten allgemeinen Anforderungen werden die Forderungen hinsichtlich der Toleranz, also Positionier- und Winkelgenauigkeit, sowie die Auslegung für unbekannte Baugrundverhältnisse für dieses Kapitel beibehalten. Als exemplarische eingebundene Länge wurde in Kapitel 3.3 eine Länge von 1,3 m angenommen, für welche die Standsicherheit nachgewiesen wurde. Dies entspricht einer Gesamtlänge der Pylone von 2 m, wenn die herausragende Länge 0,7 m beträgt. In Absprache mit dem DLR soll daher ein Konzept zur Einbringung einer Pylone von 2 bis 2,5 m Gesamtlänge entwickelt werden, wobei die herausragende Länge konstant bleibt. Die Pylone hat einen Außendurchmesser d_a von 140 mm und einer Wandstärke s von 0,5 mm. Es resultiert daher die Anforderung, ein dünnwandiges Rohr mit den genannten Maßen 1,3 bis 1,8 m in den Erdboden einzubringen.

Da es sich um ein sehr dünnwandiges Rohr handelt, besteht zudem die Gefahr, dass dieses z.B. durch größere Steine eingedrückt wird oder unter zu hoher axialer Belastung beult bzw. knickt. Die berechnete Traglast könnte dann reduziert sein, daher wird den Anforderungen die Beul-/Knickfreiheit als Forderung hinzugefügt.

Tabelle 4.1.: Anforderungen für das Einbringen der Pylone als Pfahl (Vollständige Anforderungsliste unter Anhang A.2).

Datum	F/W	Anforderungen	Verantw.
Einbringen der Pylone			
April '24	F	Einbringen der dünnwandigen Pylone der Länge 2 – 2,5 m (eingebundene Länge 1,3 – 1,8 m) mit $d_a = 140$ mm, $s = 0,5$ mm	DLR
April '24	F	Toleranz für Platzierung des Pfahls/der Pylone im Feld ± 10 mm	DLR

Fortsetzung...

April '24	F	Winkelabweichung des Pfahls/der Pylone im Vergleich zur lotrechten Aufstellung $< 5^\circ$	DLR
April '24	F	Verhindern des Knickens/Beulen der Pylone	DLR
April '24	W	Kurze Taktzeit	L. G.
Gelände- und Umwelt			
März '24	W	Unbekannte Baugrundverhältnisse/Universelle Konzeptionierung	L. G.

4.2.2. Stand der Technik & Systemanalyse

Unterschieden wird die Pfahlgründung vordergründig nach der Art des Pfahls. Für die jeweiligen Pfahlarten stehen dann entsprechende Methoden zur Einbringung zur Verfügung. Es wird zwischen Bohrpfählen (DIN EN 1 536), Verdrängungs- bzw. Ramppfählen (DIN EN 12 699) und Mikropfählen (DIN EN 14 199) unterschieden [Bol19].

Bohrpfähle werden häufig mit Ortbeton gefertigt. Dabei wird ein Bewehrungskorb in ein Bohrloch hinabgelassen und mit Beton verfüllt. Verdrängungspfähle hingegen verdrängen, dem Namen entsprechend, den Boden ohne Vorbohrung. Neben den Fertigrammpfählen bestehend aus Beton, Stahl, Gusseisen oder Holz finden auch Ortbetonrammpfähle, Schraubpfähle und verpresste Verdrängungspfähle Verwendung. [Kol19]

Die betrachtete Pylone entspricht einem Fertigrammpfahl aus Stahl mit Kreisrohrquerschnitt. Für diesen Pfahltyp haben sich die folgenden Einbringungsmethoden etabliert. [Kön14]

Langsamlaufende Rammen Freifall- und Explosionsrammen (Dieselrammen) sowie Hydraulikrammen mit bis zu 100 Schlägen/min.

Schnelllaufende Rammen Schnellschlaghämmer, die mit Druckluft oder Dampfdruck mit 120 bis 180 Schlägen/min betrieben werden.

Vibrationsrammen Rammgeräte, die über rotierende Unwuchten gerichtete Schwingungen erzeugen, die auf das Rammgut übertragen werden. Der Drehzahlbereich dieser Geräte liegt zwischen 1000 und 3000 1/min.

Einpressen Beim Einpressen werden durch statischen Druck einzelne Pfähle ohne Erschütterung in den Boden gepresst.

Um den Pfahl in die Erde einzubringen, muss der Erdbodenwiderstand überwunden werden. Die dadurch entstehenden Kräfte führen zu einer inneren Be-

4. Konzeptionierung

lastung des Pfahls. Je nach angewendetem Verfahren ist der Erdbodenwiderstand bei gleichen Bodenverhältnissen unterschiedlich. Zudem können Rammhilfen verwendet werden. Das Spülen mit Wasser durch eine Spüllanze, welche an das Stahlrohr geschweißt wird, oder das Durchführen einer Lockerungsbohrung sind z.B. möglich. Bei der Lockerungsbohrung wird dicht gelagerter Boden mit kleineren Bohrungen entlang der Pfahlachse gelockert [Kön14]. Auch das Vorbohren und Rückfüllen des Bohrguts kann dazu führen, die Widerstandskräfte zu senken.

Innerhalb der Rammtechnik findet insbesondere das Vibrationsrammen zunehmend Verwendung, da der Rammvorschub gegenüber einer Schlagrammung deutlich erhöht ist. Zudem ist der Einfluss auf benachbarte Gebäude durch Erschütterungen im urbanen Gebiet reduziert. Auch die Geräuschemissionen sind geringer. Zudem sinken die Rammkräfte deutlich, da durch die Vibration des Rammguts der Boden in Schwingung versetzt wird, wodurch dieser bei richtiger Frequenz in einen pseudoflüssigen Zustand gerät [RL80] [Küh78]. Dies führt zu einer teils erheblichen Verringerung der Pfahlmantelreibung und folglich des Erdbodenwiderstands und der Rammkräfte. Zudem verfügen Vibrationsrammen über die Möglichkeit, das statische Moment und die Schwingfrequenz anzupassen, wodurch sie für ein breites Spektrum verschiedenster Böden angewendet werden können.[Kön14]

Auch relevant, explizit beim Rammen/Einpresse von Stahlrohren, ist die Pfropfenbildung. Dabei verspannt sich der Erdboden im Inneren des Rohres aufgrund der Reibung an der Rohrrinnenseite und bildet einen Pfropfen. Dieser Pfropfen wirkt wie ein Pfahlfuß und ruft einen Pfahlfußwiderstand hervor. Dieser erhöht die Tragfähigkeit des Pfahls, jedoch auch den zu überwindenden Bodenwiderstand. Durch die Trägheit des Bodens beim Schlagen und der reduzierten Mantelreibung (auch im Inneren) beim Vibrieren, kommt es bei diesen Arten des Einbringens zu keiner Pfropfenbildung [LR07]. Die Rammkräfte sind daher geringer.

Des Weiteren existieren auch Schraubpfähle, ähnlich dem Konzept eines Erdankers, siehe *Einschrauben* in Tabelle 4.2. Hierzu muss am Pfahlfuß ein geeignetes Gewinde angebracht sein.

Neben der Art der Rammtechnik wird zwischen leichten und schweren Rammen unterschieden. Erreichen leichte Rammen Rammkräfte von ca. 200 bis 700 kN, können schwere Rammen eine Kraft von bis zu 4 000 kN aufbringen. Je nach Ramme kommen unterschiedliche Trägergeräte und Führungen zum Einsatz. Leichte Rammen werden häufig als Anbaugerät kleiner- bis mittelgroßer Hydraulikbagger oder an einer axialen Führung, einem sogenannten Teleskopmäkler, geführt, siehe Abbildung 4.1 und 4.2. Schwere Rammen werden überwiegend an Seilbaggern betrieben, siehe Abbildung 4.3. Auch andere

4.2. Einbringen von Pfählen

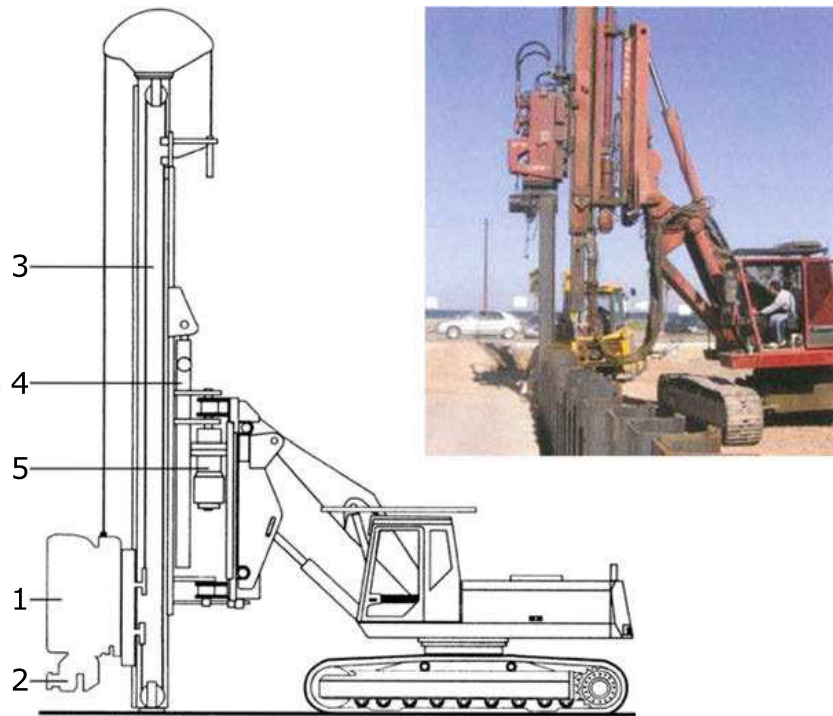


Abbildung 4.1.: Hydraulikbagger mit leichter Vibrationsramme, freireitend [Kön14].

Trägergeräte finden Verwendung, wie Abbildung 4.4 zeigt.

Neben diesen Systemen hat sich mit dem zunehmenden Aufkommen von großen Photovoltaikparks die Maschinenkategorie der *Solar Pile Drivers* entwickelt, siehe Abbildung 4.5. Dabei handelt es sich um eine kleine, durch einen Teleskopmäkler geführte Schnellschlagramme auf einem Raupenfahrgerüst. Diese Maschinen sind für das Eintreiben kleinerer Stahlprofile optimiert, um die Stützen der Gestelle von Photovoltaikanlagen oder auch Leitplanken einzutreiben.

4. Konzeptionierung



- 1 Vibrationsramme
- 2 Hydraulische Klemmzange
- 3 Teleskmäkler
- 4 Teleskopierzylinder
- 5 Mäkler-Schwenkeinrichtung

Abbildung 4.2.: Hydraulikbagger mit Teleskopmäkler [Kön14].

4.2. Einbringen von Pfählen



Abbildung 4.3.: Seilbagger mit schwerer Vibrationsramme [Kön14].

4. Konzeptionierung



Abbildung 4.4.: LKW mit Baggerarm und teleskopmäklergeführter Ramme [Mag22].

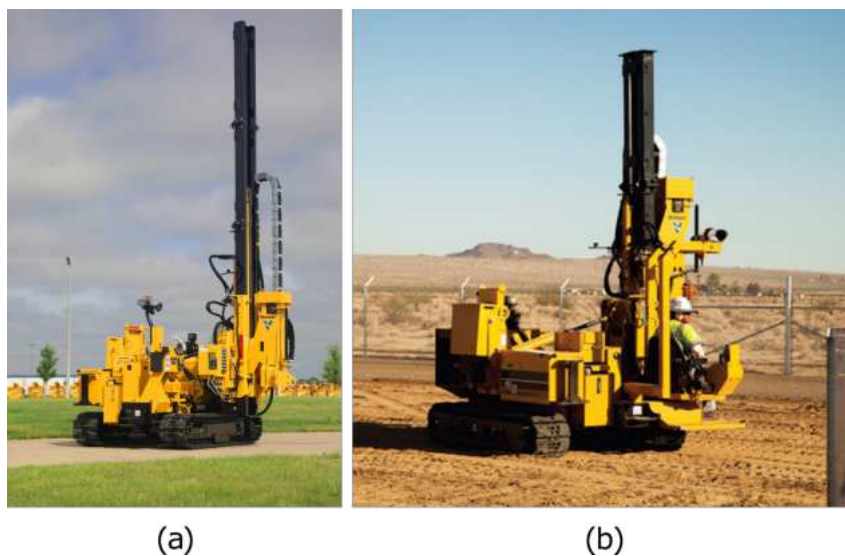


Abbildung 4.5.: Solar Pile Driver der Firma *Vermeer* ferngesteuert (a) [Atl24] und mit Bediener (b) [Sup24].

Aus dem Stand der Technik gehen drei grundlegende Hauptfunktionen hervor.

Trägergerät Als Fahrwerk kommen beispielsweise Hydraulikbagger, LKW (Abbildung 4.4) oder Raupenfahrgerüste (Abbildung 4.5) zum Einsatz.

Führung Die Ramme kann freireitend (Abbildung 4.1) oder mäklergeführt (Abbildung 4.2) betrieben werden.

Einbringtechnik Verschiedene Bauarten von Rammern stehen zur Verfügung. Klassische Schlagrammen oder Vibrationsrammen in verschiedensten Ausführungen und Größen sind möglich. Auch Pressen und Schraub-/Bohrgeräte sind verfügbar.

In diesem Abschnitt wird das Einbringen des Pfahls, also die Einbringtechnik, thematisiert. Auf die *Trägergeräte* wird in Abschnitt 4.4 und auf die *Führung* in Kapitel 5 eingegangen.

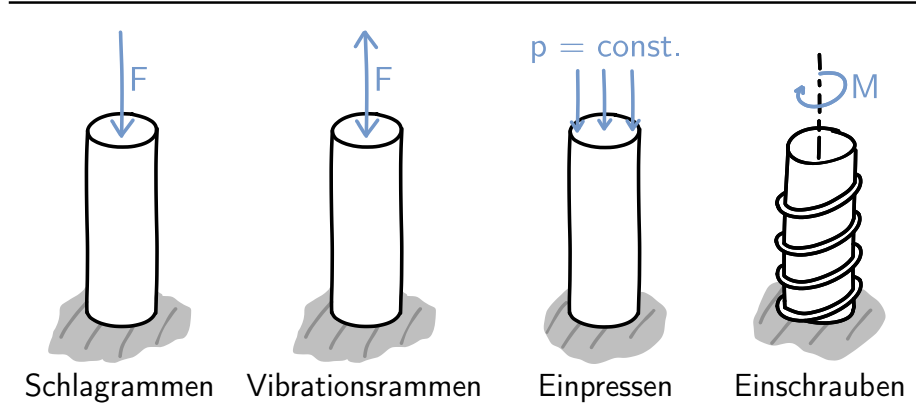
4.2.3. Auswahl des Einbringverfahrens

Die einzubringende Pylone ist mit einer Wandstärke von 0,5 mm sehr filigran. Entsprechend relevant ist die innere Bauteilbelastung resultierend aus den Rammkräften bzw. dem Bodenwiderstand. Grundsätzlich lässt sich die Pylone rammen, einpressen und einschrauben, siehe Tabelle 4.2. Das Rammen wird zu dem weiter unterteilt, in das Schlag- und Vibrationsrammen, vergl. Abschnitt 4.2.2. Das *Einschrauben* wird vorweg ausgeschlossen, da hierzu ein Gewinde am Pfahlfuß notwendig ist, welches die Material- und Fertigungskosten des Heliostaten erhöht. Auch Rammhilfen werden versucht, wenn möglich, zu vermeiden, da dies zu zusätzlichen Prozessschritten und somit zu Mehrkosten führt.

Um die Belastung auf die Pylone abzuschätzen und eine Auswahl des Verfahrens zu ermöglichen, wird der maximale Bodenwiderstand abgeschätzt. Auch hier wird wie bei der Tragfähigkeit der Pylone eine Worst-Case Abschätzung durchgeführt, da die realen Bodenverhältnisse unbekannt sind. Die Berechnung erfolgt analog zu Abschnitt 3.3.2. Allerdings werden zur Berechnung die Maxima der Erfahrungswerte des Pfahlspitzendrucks und der Pfahlmantelreibung, vergl. Anhang Tabelle A.1, verwendet. Es ergeben sich die in Abbildung A.3a gezeigten Bodenwiderstände über der eingebundenen Pfahllänge für verschiedene Verfahren und die sich ergebenden Spannungen in Abbildung A.3b. In Abbildung 4.6 ist die Auslastung ohne Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors dargestellt.

4. Konzeptionierung

Tabelle 4.2.: Verschiedene Methoden des Einbringens der Pylone in den Boden.



Beim *Einpressen* ist mit einer Pfropfenbildung zu rechnen, welche beim Schlag- und Vibrationsrammen ausbleibt [LR07]. Zudem ist beim Vibrationsrammen die Mantelreibung vermindert, hier mit 50 % angenommen [Ste19]. Entsprechend ist die Bauteilbelastung beim Einpressen mit 262 % am höchsten und beim Vibrationsrammen mit 45 % am niedrigsten. Theoretisch ist bei einer eingebundenen Pfahllänge von 1,3 m auch die Schlagrammung noch anwendbar. Nach Anwendung eines Sicherheitsfaktors von zwei bleibt nur das Vibrationsrammen unter 100 % Auslastung bei einer Streckgrenze von Baustahl mit 235 MPa.

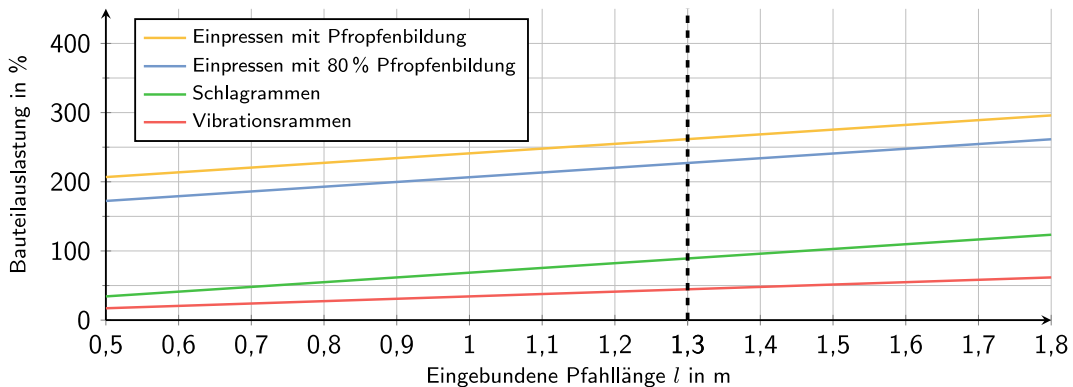


Abbildung 4.6.: Auslastung der Pylone beim Rammen mit Sicherheitsfaktor 1.

Es ist nicht auszuschließen, dass die anderen Verfahren in Kombination mit Rammhilfen, z.B. einer Lockerungsbohrung, anwendbar sind. Allerdings ist das Vibrationsrammen auch vor dem Kontext der Einbringegeschwindigkeit und der Flexibilität bzgl. der Rammbarkeit verschiedenster Böden den anderen Verfahren überlegen und wird daher als Verfahren empfohlen.

Problematisch bleiben größere Steine im Erdboden, welche aufgrund der dünnen Wanddicke der Pylone zu Beschädigungen führen können. Konstruktive Lösungen, dies zu verhindern, zeigt Tabelle 4.3. Die Lösungen 1 und 2 zeigen das Rammen mit einem innen liegenden, ausreichend massivem Rohr. In Lösung 1 wird die Pylone am Pfahlfuß umgebördelt, so dass sich ein Falz ergibt. Auf diesem Absatz liegt das Innenrohr auf und treibt die Pylone ein. Es findet eine sogenannte Fußrammung statt, da die Rammkraft am Pfahlfuß eingeleitet wird. Dadurch liegen in der Pylone nur Zugspannungen vor. Ein Beulen wird so effektiv verhindert. Ein Eindringen durch größere Steine wird durch das massive Innenrohr verhindert. Beim Ziehen des Innenrohres liegt der innere Erdboden nicht an der Pylone an und trägt daher nicht zur Tragfestigkeit bei, da sich kein Pfropfen bildet. Dies ist nicht problematisch, da in Kapitel 3.3 die Standsicherheit ohne Pfahlfußwiderstand nachgewiesen wurde. Gleiches gilt für Lösung 2. Hier liegt jedoch eine Kopframmung vor. Durch das Innenrohr wird wie beim Biegen von Rohren ein Knicken/Beulen durch einen Füllkörper verhindert. Gleichzeitig schützt das Rohr wie bei Lösung 1 vor Beschädigungen durch größere Steine. Lösung 3 und 4 sehen Versteifungen am Pfahlfuß durch Rippen vor. Diese liegen außen (Lösung 3) oder Innen (Lösung 4). Die Versteifung verhindert eventuell nicht das Eindringen durch Steine, begrenzt ein Eindringen jedoch auf den Bereich zwischen den Rippen. Ein Beulen wird über den Bereich der Versteifung effektiv verhindert. Lösung 4b entspricht Lösung 4a mit einer Fußrammung anstelle der Kopframmung. Auch hier kann die Fußrammung durch ein Innenrohr erfolgen, welches auf den Versteifungsrippen aufliegt. Das Beulen wird dann auch über den Rest der Pylone verhindert.

Die gezeigten Lösungen sehen bis auf Lösung 2 zusätzliche Funktionselemente an der Pylone vor und erhöhen daher die Stückkosten der Produktion. Die Lösungen mit Fußrammung sind zudem nur für das Schlagrammen geeignet, da ohne ein Spannfutter keine Kräfte in beide Richtungen eingeleitet werden können. Die Schlagrammung wird jedoch aufgrund der hohen Rammkräfte nicht weiterverfolgt. Innen liegende Rippen fördern zudem die Pfropfenbildung und erhöhen daher den Bodenwiderstand. Lösung 2 erscheint optimal, da das Innenrohr nur als „Knickschutz“ eingeführt wird und keine Funktionselemente an der Pylone benötigt werden. Die Kraft wird über ein Spannfutter der Ramme am Pfahlkopf eingeleitet. Das Innenrohr ist bei diesem Konzept fester Bestandteil der Ramme und des Spannfutters.

Die benötigte Rammkraft beträgt weniger als 100 kN und liegt im Einstiegsbereich leichter Vibrationsrammen, vergl. Abbildung A.2. Eine der kleinsten am Markt verfügbaren Vibrationsrammen vom Hersteller *PTC Fayat Group* ist das Modell *1PHF* mit bis zu 69 kN Zentrifugalkraft (entspricht der Ramm-

4. Konzeptionierung

Tabelle 4.3.: Verschiedene Möglichkeiten das Beulen der Pylone beim Auftreffen auf größere Steine zu verhindern.

1	2	3	4a	4b
Fußrammen mit Innenrohr	Kopframmen mit Innenrohr	Kopframmung mit Versteifung (außen)	Kopframmung mit Versteifung (innen)	Fußrammung Versteifung (innen)

kraft) oder das etwas größere Modell *4PHF* light mit bis zu 145 kN Zentrifugalkraft. Beide Rammen wiegen unter 1000 kg und können daher an Midi- oder Kompaktbaggern mit einem Gewicht von 5 bis 20 t verwendet werden. Entsprechende Datenblätter liegen im Anhang vor, siehe Abbildung A.4. Eine exemplarische Abbildung einer Vibrationsramme der Firma *PTC Fayat Group* ist in Abbildung 4.7 zu sehen (Datenblatt im Anhang A.5).



Abbildung 4.7.: Vibrationsramme der Firma *PTC Fayat Group* (Datenblatt im Anhang A.5.) [AG24a]

4.3. Konzentrator-Montage

Aus dem Vibrationsrahmen mit Innenrohr folgt zwangsläufig, dass der Helio-
stat in zwei Prozessschritten installiert werden muss. In Prozessschritt 1 wird
die Pylone gerammt, in Prozessschritt 2 wird der Konzentrator und die Nach-
führeinheit auf der gerammten Pylone montiert. Die Nachführeinheit und der
Konzentrator als eine Baugruppe werden im weiteren Teil der Arbeit abkür-
zend nur als Konzentrator bezeichnet. Details der Konstruktion sind zu diesem
Zeitpunkt (Stand 2024) nicht abschließend seitens des DLR geklärt. Es werden
zwei zu fügende Rohrstümpfe angenommen, wobei der Rohrstumpf am Kon-
zentrator Antriebselemente enthält, so dass die Teilungsebene leicht unterhalb
liegt, siehe Abbildung 4.8.

Von zentraler Bedeutung für die Konzentrator-Montage ist das Fügever-
fahren, da entsprechend Kapitel 4.1 *Grundüberlegung* die hierfür notwendigen
Maschinen die anschließende Wahl der Trägergeräte und der Peripherie beein-

4. Konzeptionierung

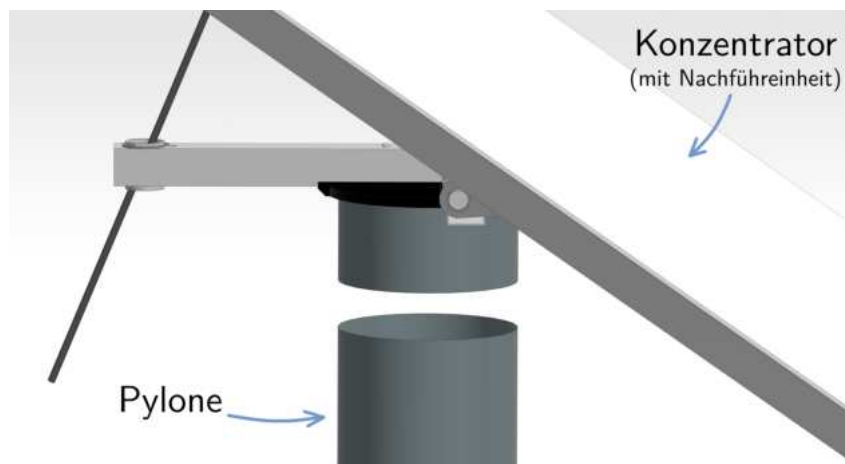


Abbildung 4.8.: Veranschaulichung der Teilung von Pylone und Konzentrator (mit Nachführeinheit) für Prozessschritt 1 und 2.

flusst.

Es werden verschiedene Fügeverfahren diskutiert und durch eine Detailbewertung ein geeignetes ausgewählt. Im Folgenden werden die spezifischen Anforderungen an den Fügeprozess erläutert.

4.3.1. Anforderungen – Fügeverfahren

Für Prozessschritt 2 werden grundsätzlich zwei Rohrstümpfe gefügt. Dies wird der Anforderungsliste, siehe Tabelle 4.4, hinzugefügt. Vor dem Hintergrund des Kostendrucks lassen sich weitere Anforderungen hinsichtlich des Fügeverfahren ableiten:

Das Fügeverfahren darf keine hohe Toleranzanforderung bzgl. der zu fügenden Komponenten aufweisen, da genauere Toleranzen auch zu höheren Fertigungskosten führen. Beispielsweise ist die Toleranzanforderung eines Pressverbands höher als beim Lichtbogenschweißen. Wesentlich für die Kosten ist zudem die Taktzeit. Diese sollte möglichst niedrig sein, um mehr Heliostaten in der gleichen Zeit montieren zu können. Weiter sollen die Betriebskosten des Verfahrens gering sein. Energieverbrauch und Verbrauchsmittel wie z.B. Niete oder Schutzgas sind daher zu berücksichtigen. Auch das Gewicht der Maschinen spielt eine Rolle. Leichte Maschinen weisen grundsätzlich auch einen geringeren Energieverbrauch auf. Gleichzeitig nimmt das Gewicht der Maschinen direkt Einfluss auf die Trägergeräte, da zum Tragen schwerer Maschinen auch größerer Fahrzeuge notwendig sind. Die Investitions- und Betriebskosten der Trägergeräte steigen demnach mit dem Gewicht der Maschinen. Nach der technischen Notwendigkeit besteht daher auch aus Kostengründen der Wunsch, ein

Verfahren auszuwählen, für das leichte Maschinen verwendet werden können.

Aus technischer Sicht ist die Prozesssicherheit entscheidend. Diese muss im Freien unter Umweltbedingungen gegeben sein. Damit ist nicht zwangsläufig eine schlechte Wetterlage gemeint. Dennoch gibt es z.B. Staubverwehungen und Temperaturschwankungen. Eine Klebeverbindung, welche genaue Prozessparameter benötigt, wäre daher beispielsweise schlecht geeignet. Gefordert ist auch eine Lebensdauer der Verbindung von 25 Jahren und die Spielfreiheit. Letztere ist wichtig, da es unter der ständig wechselnden Windeinwirkung auf Dauer zu Schäden kommen könnte. Auch im Betrieb ist die Spielfreiheit notwendig, um Schwingungen am Konzentrator und folglich des Brennpunktes zu vermeiden. Weiter ist die Trennbarkeit bzw. bedingte Trennbarkeit der Komponenten zur Wartung und Reparatur gewünscht.

Die spezifischen Anforderungen für den Fügeprozess der Konzentrator-Montage liegen in Tabelle 4.4 vor.

Tabelle 4.4.: Anforderungen für Fügen/Montieren des Konzentrators auf der Pylone (Vollständige Anforderungsliste unter Anhang A.2).

Datum	F/W	Anforderungen	Verantw.
Fügeverfahren			
März '24	F	Optimierung der Heliostat-Konstruktion für den Installationsprozess ohne nennenswerte Fertigungskostensteigerung je Heliostat	DLR
April '24	F	Zweiteilige Installation des Heliostaten – 1. Pylone, 2. Konzentrator	DLR
April '24	F	Fügen von Konzentrator und Pylone(entspricht Fügen von zwei Rohrstümpfen)	DLR
April '24	F	Geringe Toleranzanforderungen an die zu fügenden Bauteile	DLR
April '24	F	Geringe Betriebskosten – z.B. Energie, Verbrauchsmittel usw.	DLR
April '24	W	Geringes Gewicht der notwendigen Maschinen	DLR
April '24	F	Hohe Prozesssicherheit auch unter Umweltbedingungen	DLR
April '24	F	Kurze Taktzeit	DLR
April '24	W	Geringe/Keine Umweltbelastung – z.B. Emissionen	DLR

Fortsetzung...

4. Konzeptionierung

April '24	W	Trennbare oder bedingt trennbare Verbindung	DLR
April '24	F	Lebensdauer der Verbindung von ca. 25 Jahren	DLR
April '24	F	Spielfreie Verbindung	DLR

4.3.2. Eingrenzung der Fügeverfahren

Es gilt ein geeignetes Fügeverfahren auszuwählen, welches den technischen und wirtschaftlichen Anforderungen entspricht. Gleichzeitig muss die Anwendbarkeit auf die Konstruktion gegeben sein, ohne deren Kosten durch Anpassungen stark zu erhöhen.

Grundsätzlich lassen sich Fügeverfahren nach der Art der Verbindung einteilen:

- Formschlüssig
- Reibschlüssig
- Stoffschlüssig

Des Weiteren kann nach der Art der Trennbarkeit untergliedert werden.

- Nicht trennbar
- Trennbar
- Bedingt trennbar

Nach *DIN 8593* [Beu03] wird das Fügen in die folgenden neun Hauptkategorien einteilen. Die eingeklammerten Buchstaben entsprechen der Kennzeichnung für Tabelle 4.6.

1. (A) Zusammensetzen
2. (-) Füllen
3. (B) An- und Einpressen
4. (-) Fügen durch Urformen
5. (C) Fügen durch Umformen
6. (D) Schweißen
7. (E) Löten

- 8. (F) Kleben
- 9. (-) Textiles Fügen

Die grundsätzlichen Möglichkeiten, beide Komponenten zu fügen, zeigen die abstrahierten Zeichnungen in Tabelle 4.5. Es ist ersichtlich, dass ohne Anpassungen der Konstruktion, nur eine einseitige Zugänglichkeit gegeben ist. Tabelle 4.6 zeigt für die aufgelisteten Hauptkategorien und die in Tabelle 4.5 gezeigten Prinzipien der Zugänglichkeit Lösungen zum Fügen von Pylone und Konzentrator. Zu beachten ist, dass das *Füllen* und das *Textile Fügen* keine Optionen darstellen und daher nicht betrachtet werden. Auch nicht betrachtet wird das *Fügen durch Urformen*. Sicherlich lassen sich für diese Kategorie Lösungen finden, jedoch stellen diese keine realistische Option dar.

Tabelle 4.7 zeigt, wenn vorhanden, weitere Varianten der in Tabelle 4.6 aufgeführten Verfahren. Die Nummerierung einer Zeile ergibt sich aus dem Buchstaben und der Zahl aus Tabelle 4.6. Spalten werden mit einem Kleinbuchstaben betitelt. Zum Beispiel entspricht die *Verschraubung* in Tabelle 4.6 dem Feld B3. In Tabelle 4.7 entspricht diese Lösung B3a. Weitere Varianten lauten dann B3b, B3c usw.

Tabelle 4.5.: Veranschaulichung der grundsätzlichen Zugänglichkeit beim Fügen der Rohrstümpfe.

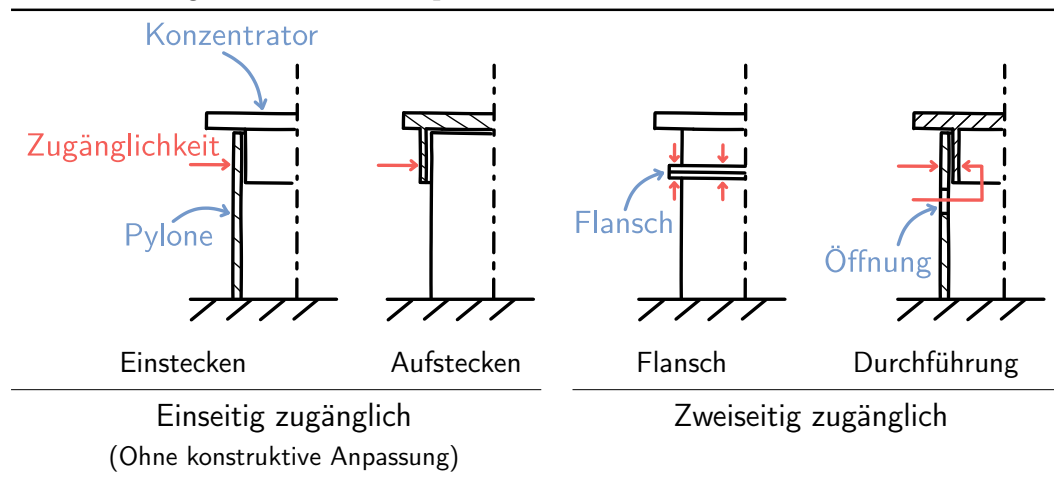
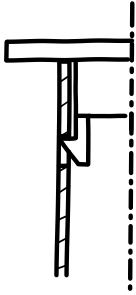
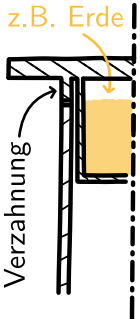
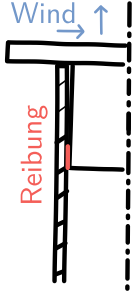
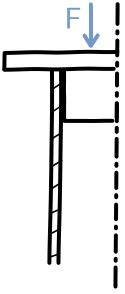
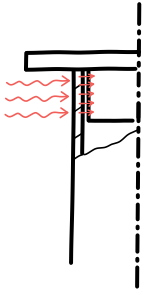
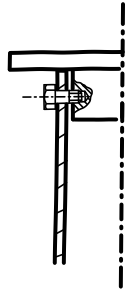
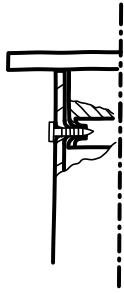
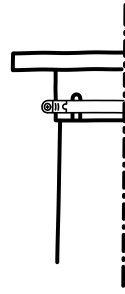
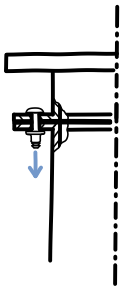


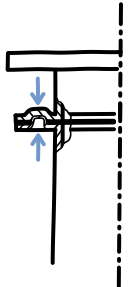
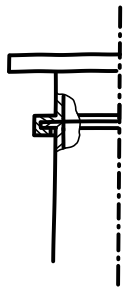
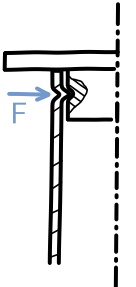
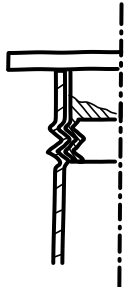
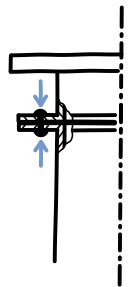
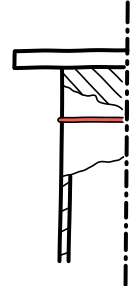
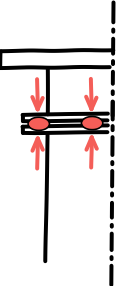
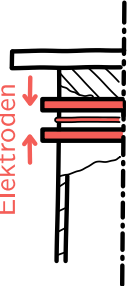
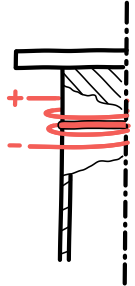
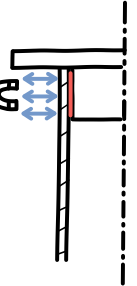
Tabelle 4.6.: Anwendbare Fügeverfahren nach Hauptgruppen gemäß DIN 8593.

Hauptgr.	Lösungen					
	1	2	3	4	5	6
A						
	Schnappmechanismus	Einlegen mit Gewichten	Einlegen mit Selbsthemmung (Verkeilen)			
B						
	Pressverband	Schrumpfverband	Verschraubung	Hochgeschwindigkeitsbolzensetzen	Klemme (z.B. Rohrschelle)	Schließringbolzen

A Zusammensetzen, B An-/Einpressen, C Fügen durch Umformen, D Schweißen, E Löten, F Kleben

Fortsetzung ...

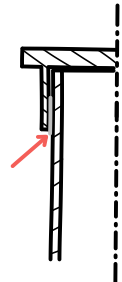
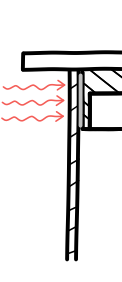
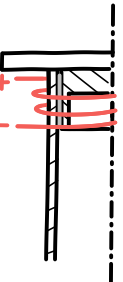
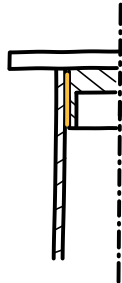
Tabelle 4.6.: Anwendbare Fügeverfahren nach Hauptgruppen gemäß DIN 8593.

Hauptgr.	Lösungen					
	1	2	3	4	5	6
C						
	Clinchen	Bördeln/Falzen	Eindrücken	Knickbauchen	Nieten	
D						
	Lichtbogen-schweißen	Punktschweißen	Abbrennstumpf-schweißen	Induktionsschweißen	Magnetimpuls-schweißen	

A Zusammensetzen, B An-/Einpressen, C Fügen durch Umformen, D Schweißen, E Löten, F Kleben

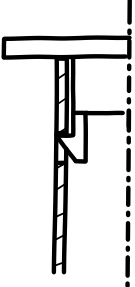
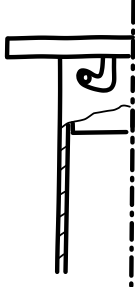
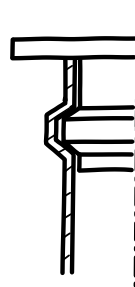
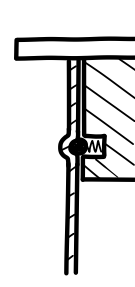
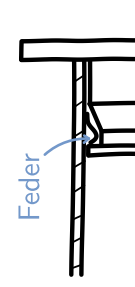
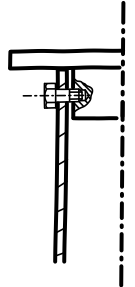
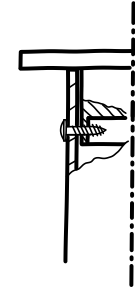
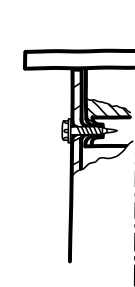
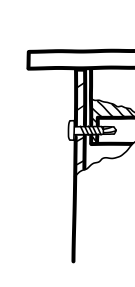
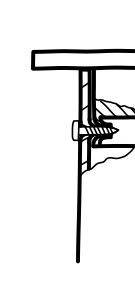
Fortsetzung ...

Tabelle 4.6.: Anwendbare Fügeverfahren nach Hauptgruppen gemäß DIN 8593.

Hauptgr.	Lösungen					
	1	2	3	4	5	6
E						
	(Weich-/Hart) Löten	Löten mit vorappliziertem Lot	Induktionslöten			
F						
	Metall-Metall Klebverbindung					

A Zusammensetzen, B An-/Einpressen, C Fügen durch Umformen, D Schweißen, E Löten, F Kleben

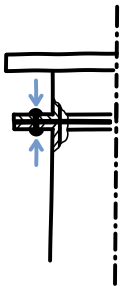
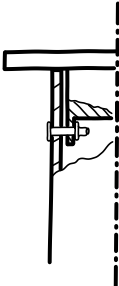
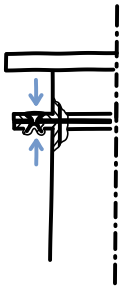
Tabelle 4.7.: Variation der Fügeverfahren aus Tabelle 4.6.

Konzept	Varianten				
	a	b	c	d	e
A1					
	Einhaken	Bajonettverschluss	Nut mit Konus	Kugerverschluss	Federklemme
B3					
	Schrauben in Gewinde	Blechschraube mit Vorlochen	Fließlochschrauben	Bohrschrauben	Dünnschrauben

A1 Schnappmechanismus, B3 Verschraubung, C5 Nieten

Fortsetzung ...

Tabelle 4.7.: Variation der Fügeverfahren aus Tabelle 4.6.

Konzept	Varianten				
	a	b	c	d	e
C5	 <p>Nieten mit Gegenhalter</p>	 <p>Bildniet</p>	 <p>Stanzniet</p>		
A1 Schnappmechanismus, B3 Verschraubung, C5 Nieten					

4.3.3. Bewertung der Fügeverfahren

Die in Tabelle 4.6 und 4.7 aufgelisteten Verfahren sind bis auf einige Ausnahmen alle anwendbar und weisen verschiedene Vor- und Nachteile auf. Daher werden die Verfahren direkt nach Tabelle 2.2 im Detail bewertet und der Nutzwert nach Gleichung (2.2) bestimmt.

Die Verfahren A1a bis A1e, A3, C4 und D5 werden von dieser Betrachtung ausgeschlossen. Für die gesamten *Schnappmechanismen* A1a bis A1e gilt, dass die geforderte Spielfreiheit nur unter hohem technischen Aufwand realisierbar ist, da zum sicheren Einrasten in der Regel ein wenig Spiel notwendig ist. Zwar können Federelemente oder eine geschickte Gestaltung dies verhindern, jedoch steigt dadurch der konstruktive Aufwand. Es ist wahrscheinlich, dass der Vorteil der einfachen, quasi werkzeuglosen Montage diese Mehrkosten bei der Produktion nicht ausgleicht. Das Konzept des *Einlegen mit Selbsthemmung* A3 ist nicht realistisch anwendbar, da die Windlast teils oszilliert und zudem den Heliostaten zum Schwingen anregt. Eine Selbsthemmung durch Verkeilen wie in Tabelle 4.6 dargestellt, ist daher nicht gewährleistet. Auch wenn die Komponenten sich nicht trennen, ist die Lösung dadurch nicht spielfrei. Auch das *Knickbauchen* C4 ist nicht anwendbar, da für eine Einstauchung wie in Tabelle 4.6 die Konstruktion auch innen voll zugänglich sein müsste, was nicht gegeben ist. Da das Verfahren zudem auch technisch anspruchsvoll ist, schwere Maschinen benötigt und keine Trennbarkeit gegeben ist, wird dieses ausgeschlossen. Das *Magnetimpulsschweißen* (D5) bietet eine Möglichkeit, die Komponenten ohne Temperatureintrag zu fügen. Dabei werden die Bauteile durch Kollision unter hoher Geschwindigkeit gefügt. Die Prozessanforderungen sind sehr hoch und es ist fraglich, ob das Verfahren bei gleichen Werkstoffen der Fügepartner anwendbar ist.

Die Bewertungskriterien sind aus den in Tabelle 4.4 aufgeführten Anforderungen abgeleitet. Es wird unterschieden in wirtschaftliche, technische und sonstige Kriterien. Die Mehrzahl der Kriterien bezieht sich auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahren, gefolgt vom technischen Gesichtspunkt. Durch die einheitliche Gewichtung mit 0,66 wird dadurch die Priorisierung auf die Wirtschaftlichkeit gelegt. Dies erfolgt vor dem Hintergrund des Kostendrucks. Gleichzeitig ermöglicht die Gewichtung von 0,66, das Kriterium *Gewicht der notwendigen Maschinen* in der Kategorie Sonstiges mit 1 etwas stärker zu gewichten, da dieses Bewertungskriterium größeren Einfluss auf die im Abschnitt 4.4 auszuwählenden Trägergeräte nimmt. Die Trennbarkeit wird als Wunsch nur mit 0,33 gewichtet.

Die Kriterien werden im Folgenden erläutert. Im Anschluss erfolgt die Erläuterung der Verfahren und deren Bewertung. Die Bewertung liegt in Tabelle 4.8 vor.

4. Konzeptionierung

Wirtschaftliche Kriterien $\sum 2,66$

Konstruktive Anpassung (0,66) – Sind zusätzliche Funktionselemente notwendig? Müssen Absätze, Gewinde oder Vorlochungen geschaffen werden? Wie muss die Toleranzklasse der Bauteile sein, um das Verfahren anwenden zu können?

Prozessanforderungen (0,66) – Hat der Fügeprozess einen hohen Anspruch an die Führung der Werkzeuge und die Platzierung der Bauteile zueinander? Sind die Prozessparameter genau zu überwachen, um die Bauteile sicher zu fügen? Werden hohe Kräfte, Drehzahlen oder Temperaturen benötigt? Werden zusammengefasst sehr aufwendige Maschinen benötigt?

Fügeschwindigkeit/Taktzeit (0,66) – Eine kürzere Taktzeit bedeutet in der Regel auch einen kostengünstigeren Prozess. Werden viele einzelne Prozessschritte benötigt? Müssen z.B. viele Schrauben eingeschraubt werden und kann dies z.B. gleichzeitig erfolgen, oder ist es realistischer, dass ein Roboter das Werkzeug neu platziert?

Energie- und Materialverbrauch (0,66) – Ist der Prozess sehr energieaufwendig, weil z.B. hohe Temperaturen oder Kräfte notwendig sind? Gibt es Verbrauchsgüter, die die Kosten erhöhen?

Technische Kriterien $\sum 2$

(Dauer-) Festigkeit/Lebensdauer (0,66) – Wie ist die allgemeine Festigkeit bzw. Dauerfestigkeit des Verfahrens? Besteht das Risiko von Korrosion oder Passungsrost? Wird z.B. die Oberflächenbeschichtung beschädigt?

Materialauswirkungen (0,66) – Es befinden sich Kunststoffteile vom Getriebe zur Verstellung des Heliostaten in der Nähe der Fügestelle. Kommt es hier zu Beschädigungen durch Temperatureinwirkung? Entstehen Eigenspannungen oder andere unerwünschte Effekte?

Prozesssicherheit (0,66) – Ist der Prozess gut kontrollierbar und auch unter Umwelteinflüssen beherrschbar? Ist eine gute Qualitätskontrolle möglich? Handelt es sich um ein erprobtes Verfahren oder ist das technologische Risiko hoch?

Sonstige Kriterien $\sum 1,33$

Gewicht der notwendigen Maschinen (1) – Das Gewicht der Maschinen beeinflusst direkt die Trägergeräte der Maschinen und somit deren Investitions- und Betriebskosten. Sind die Maschinen aufwendig und schwer, steigt auch die Größe und das Gewicht des notwendigen

Trägergerätes. Kann ein leichter Schraubautomat an einem Leichtbeuroboter verwendet werden, oder ist ein großer Industrieroboter notwendig?

Trennbarkeit (0,33) – Ist eine Trennbarkeit oder bedingte Trennbarkeit zur Reparatur oder Wartung möglich?

Für das Verfahren A2 *Einlegen mit Gewichten* ist eine umfangreiche Anpassung der Konstruktion notwendig. Der Materialaufwand steigt. Die Toleranzen müssen hoch sein, damit die Verbindung spielfrei ist. Der Fügeprozess ist dagegen nicht aufwendig. Der Konzentrator wird schlicht eingelegt. Entsprechend niedrig ist die Taktzeit und der Energieverbrauch. Es fallen keine Verbrauchsgüter an. Bei Spielfreiheit und ausreichend hoher Masse ist die Festigkeit und Lebensdauer gut erreichbar. Materialauswirkungen gibt es keine und die Prozesssicherheit ist gut. Das technologische Risiko ist beherrschbar. Die Maschine zum Ablegen muss ein höheres Gewicht aufgrund der zusätzlichen Masse tragen können und ist entsprechend etwas größer. Die Trennbarkeit ist gut gegeben.

Die reibschlüssigen Verbindungen B1 *Pressverband* und B2 *Schrumpfverband* kommen ohne größere konstruktive Anpassungen aus, wobei allerdings beim Pressverband die Bauteilgenauigkeit an den Fügestellen sehr hoch sein muss. Auch die Prozessanforderungen sind hier höher. So muss die Führung beim Einpressen sehr genau sein. Beim Schrumpfverband sind die Toleranzanforderungen geringer, der Energieverbrauch jedoch höher. In beiden Fällen besteht die Gefahr von Passungsrost. Die Prozessparameter müssen daher gut eingehalten werden. Bei der Erwärmung besteht die Gefahr, die Oberflächenbeschichtung und die Kunststoffgetriebeteile zu beschädigen. Die Maschinen zum Einpressen fallen massiver aus, um die notwendige Kraft aufbringen zu können. Die Trennbarkeit ist nicht ohne weiteres gegeben.

Die Verschraubungen erfordern unterschiedliche Anpassungen. Das *Schrauben in Gewinde* (B3a) und die *Blechschauben mit Vorlochen* (B3b) erfordern ein Gewinde bzw. eine Vorlochung. Für dieses muss ausreichend Wandstärke gegeben sein. Auch muss bei der Platzierung des Konzentrators darauf geachtet werden, dass die Lochungen übereinander liegen. Die Position muss gesucht werden, da kaum kontrolliert werden kann, mit welcher Ausrichtung die Pylo- ne gerammt wird. Dieser Schritt entfällt beim *Fließlochschrauben* (B3c), dem *Bohrschrauben* (B3d) und den *Dünnblechschauben* (B3e), da diese Verfahren ohne Vorlochen auskommen. Die Prozessanforderungen beim Fließlochschrauben sind sehr hoch. Drehzahl und Anpressdruck müssen genau geregelt werden. Die Maschinen sind aufwendig und schwer. Die anderen Schraubverfahren können dagegen mit einfachen Schraubautomaten ausgeführt werden, z.B. mit automatischer Zuführung der Schrauben. Als Verbrauchsmittel fallen die Schrauben an. Auch hier sind die Fließlochschrauben aufgrund der ho-

4. Konzeptionierung

hen Anforderungen kostspieliger. Die Bohrschraube und Dünnschraube stellen geeignete Alternativen dar. Die Dünnschraube funktioniert nach ähnlichem Prinzip wie das Fließlochschrauben, jedoch mit geringerer Festigkeit und nur bei sehr dünnwandigen Bauteilen. Dies ist hier gegeben. Der Vorteil gegenüber der Bohrschraube ist, dass zusätzliche Gewindegänge ohne scharfe Kerben durch das Wegfließen des Materials geschaffen werden, welche die Festigkeit erhöhen. Alle Schraubverfahren ermöglichen eine einfache Trennbarkeit und sind über die Erfassung des Drehmoments gut kontrollierbar. Die Prozesssicherheit ist dementsprechend gegeben.

Das *Hochgeschwindigkeitsbolzensetzen* (B3) ist ähnlich dem Fließlochschrauben ein Prozess mit hohen Anforderungen. Durch das Einschließen der Bolzen werden die zu fügenden Bauteile ohne Vorlochen verstiftet. Die Konstruktion muss versteift werden, um die hohen Kräfte abzutragen, ohne zu Verformungen zu führen. Die Fügegeschwindigkeit, der Energieverbrauch und der Verbrauch von Verbrauchsmaterialien ist vergleichbar mit den Schraubverfahren. Das aus dem Leichtbau stammende Verfahren ermöglicht hohe Festigkeiten und durch das fließen des Materials entstehen keine scharfen Kanten. Auch handelt es sich um einen etablierten Prozess. Die Maschinen sind aufwendig und schwer. Die Trennbarkeit ist durch Aufbohren der Verbindung bei Bedarf gegeben.

Die *Rohrschelle* (B4) erhöht die Stückkosten massiv. Die Konstruktion muss so angepasst werden, dass der Rohrstumpf zusammengezogen werden kann, z.B. durch Einschlitzen. Ansonsten ist sich leicht zu verwenden und überzeugt durch geringe Toleranzanforderungen und einen geringen Energieverbrauch. Die Festigkeit und Lebensdauer ist gut beherrschbar. Das Maschinenelement ist etabliert und die Prozesssicherheit gegeben. Materialauswirkungen gibt es nicht. Als Maschinen kommen z.B. Schraubautomaten infrage, welche die vormontierte Schelle nach dem Zusammensetzen festziehen. Die Trennbarkeit ist gut gegeben.

Der *Schließringbolzen* (B6) ist etabliert und gut beherrschbar. Es wird jedoch eine zweiseitige Zugänglichkeit sowie eine Vorlochung vorausgesetzt. Die Konstruktion muss entsprechend angepasst werden. Die Prozessanforderungen und der Energieverbrauch sind gering. Die Fügegeschwindigkeit ähnelt dem Schrauben, wobei der Automatisierungsaufwand aufgrund des zweiseitigen Aufbaus eines Schließringbolzens etwas höher ist. Auch dieses Verfahren ist sehr etabliert und gut beherrschbar. Die Maschinen sind eher leicht. Die Trennbarkeit ist durch Aufbohren gegeben.

Die Verfahren der Kategorie C *Fügen durch Umformen* kommen bis auf das *Nieten* alle ohne Verbrauchsmaterialien aus. Allerdings ist in der Regel die zweiseitige Zugänglichkeit erforderlich, da häufig ein Gegenhalter benötigt wird, so etwa beim *Clinchen* (C1). Daher ist als konstruktive Anpassung ein

Flansch oder eine Durchführung ins Innere der Pylone notwendig. Auch beim *Bördeln/Falzen* (C2) ist ein Absatz zum Umbördeln notwendig. Die Fügegeschwindigkeit des Clinchens gleicht dem Schrauben. Beim Umbördeln werden mehrere Arbeitsgänge benötigt, so dass die Taktzeit etwas höher ist. Auch muss die Maschine die Pylone hierzu einmal umkreisen. Die Prozessanforderungen sind durchschnittlich. Es existieren keine erhöhten Toleranzanforderungen. Die Festigkeit und die Prozesssicherheit ist insbesondere beim Clinchen hoch, welches sich als sehr kostensparende Alternative zum Punktschweißen bewährt hat. Einzig das *Eindrücken* (C4) stellt auf dieser Ebene ein Risiko dar, da fraglich ist, ob dies ausreicht, um die Kräfte und Schwingungen abzutragen. Das Umformen führt zu Spannungen, welche berücksichtigt werden müssen. Auch wird die Oberflächenbeschichtung an den stark verformten Stellen ggf. beschädigt, was Korrosion bedingen kann. Da bei allen umformenden Verfahren hohe Kräfte erforderlich sind, sind entsprechende Werkzeuge oft massiv und schwer. Die Trennbarkeit ist beim Clinchen und Eindrücken durch Aufbohren gegeben. Beim Falzen ist die einfache Trennbarkeit nicht gegeben.

Das *Nieten* (C5) ist sehr etabliert, die Prozessanforderungen überschaubar und die Prozesssicherheit gegeben. Nennenswerte Materialauswirkungen gibt es keine. An den Fügestellen kann es zu Problemen mit Korrosion kommen. Als Verbrauchsmaterial fallen die Niete an, welche in der Regel sehr günstig sind. Die Maschinen sind je nach Art des Niets recht massiv, um die Kräfte aufzubringen, so etwa beim klassischen *Nieten mit Gegenhalter* (C5a) oder beim *Stanzniet* (C5c). Dagegen ist für das Setzen eines *Blindniets* (C5b) keine schwere Maschine notwendig. Die Trennbarkeit ist durch Aufbohren gegeben. Da beim Nieten mit Gegenhalter und beim Stanznieten ein Gegenhalter erforderlich ist, muss die zweiseitige Zugänglichkeit konstruktiv ermöglicht werden. Eine Vorlochung und die entsprechende Ausrichtung beim Fügen ist beim Nieten mit Gegenhalter und beim Blindnieten erforderlich.

Die Schweißverfahren (D) sehen keine konstruktiven Anpassungen vor, abgesehen vom *Punktschweißen* (D2), für das wie beim Clinchen die zweiseitige Zugänglichkeit realisiert werden muss. Die Prozessanforderungen sind überschaubar. Spezielle Führungen oder hohe Toleranzklassen sind nicht notwendig. Die Fügegeschwindigkeit ist beim *Lichtbogenschweißen* (D1) und beim Punktschweißen etwas schlechter als bei den anderen Verfahren, da mehrere Vorgänge notwendig sind bzw. einmal die Pylone umkreist werden muss. Der Energieaufwand ist je nach Verfahren erhöht. Beim klassischen Lichtbogenschweißen wird zudem Schutzgas und Schweißzusatz verbraucht. Die Festigkeit ist gut, allerdings besteht in der Regel die Gefahr der Korrosion im Bereich der Naht. Auch gibt es einen Temperatureintrag, welcher die Oberflächenbeschichtung und Kunststoffteile beeinflussen könnte. Beim *Abbrennstumpfschweißen*

4. Konzeptionierung

(D3) wird der Strom der Elektroden durch die zwei Rohrstümpfe geleitet, welche zusammengepresst werden. Durch den erhöhten Übergangswiderstand an der Fügestelle schmilzt das Material auf. Der Prozess ist folglich etwas aufwendiger, da Spannbacken als Elektrode und eine gewisse Anpresskraft gegeben sein muss. Beim *Induktionsschweißen* (D4) wird die Erwärmung durch Induktion hervorgerufen. Auch hier müssen die Bauteile leicht zusammengepresst werden. Für das Lichtbogenschweißen und Punktschweißen können kleine Maschinen zum Einsatz kommen. Durch die notwendige Anpresskraft, das Spannfutter oder die Induktionszange sind die Maschinen der anderen Verfahren aufwendiger und schwerer. Die Trennbarkeit ist in der Regel nicht gegeben.

Das *Löten* (E) bietet eine spannende Alternative zum Schweißen, da der Energieaufwand und Temperatureintrag geringer sind. Das normale (*Weich/Hart-*) *Löten* erfolgt ähnlich wie beim MIG/MAG-Schweißen über einen Löt-automat mit automatischer Lotzufuhr. Die Fügstellen müssen sauber sein und mit Flussmittel vorbehandelt werden. Die Sauberkeit kann im Freien ggf. nicht gewährleistet werden. Problematisch ist, dass keine Qualitätskontrolle möglich ist, ob das Lot den Spalt zwischen den Bauteilen gut und flächig gefüllt hat. Abhilfe kann das fabrikseitige Vorapplizieren des Lots auf den Fügstellen sein. Nach dem Zusammensetzen muss dieses nur aufgeschmolzen werden, wobei die Erwärmung durch eine Wärmequelle (E2) oder induktiv (E3) erfolgen kann. Nimmt man an, dass Weichlöten (unter 450°C) ausreicht, um die geforderte Festigkeit zu erreichen, ist zudem der Einfluss auf die Oberflächenbeschichtung und naheliegende Kunststoffbauteile sehr gering. Gleichzeitig sind Weichlotverbindungen durch erneute Erhitzung bedingt trennbar.

Das Kleben einer *Metall-Metall Klebeverbindung* (F1) erfordert keine Anpassungen der Konstruktion. Die Fügegeschwindigkeit ist hoch, sofern die Komponenten während des Aushärtens nicht zusammengehalten werden müssen, sondern von alleine in Position bleiben. Ansonsten ist die Taktzeit auch bei schnell aushärtenden Klebstoffen sehr hoch. Der Energie- und Materialverbrauch ist gering. Lediglich der Klebstoff fällt als Verbrauchsmaterial an. Problematisch sind die Prozessanforderungen bzw. die Prozesssicherheit und Lebensdauer. Für die Herstellung einer zuverlässigen Klebeverbindung sind die Umweltfaktoren, wie beispielsweise eine konstante Temperatur während des Aushärtens, entscheidend. Auch müssen die Fügstellen sauber sein und ggf. mit einem Primer vorbereitet werden. Dies ist im Freien schwierig zu realisieren. Auch ist die Klebeverbindung ganzjährig der Witterung ausgesetzt, insbesondere hohen Temperaturen (sonnenreiche Regionen), auch wenn die Fügestelle sich im Schatten der Spiegelfläche befindet. Das technologische Risiko ist daher höher als bei anderen Verbindungen. Zudem sind Klebstoffe recht kostenintensiv. Die Trennbarkeit ist je nach Art des Klebstoffs ggf. z.B. durch Erwärmen gegeben.

Tabelle 4.8.: Bewertung der Fügeverfahren und Berechnung des Gesamtwerts G_{wj} sowie der Wertigkeit W_j nach Gleichung (2.1) und 2.2.

Nr.	Konstruktive Anpassung	Prozessanforderung	Fügeschw./Taktzeit	Energie- und Materialverbrauch	(Dauer-) Festig- keit/Lebensdauer	Materialauswirkungen	Prozesssicherheit	Gewicht der notw. Maschinen	Trennbarkeit	G_{wj}	W_j
	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	1	$\frac{1}{3}$		
A2	0	3	4	4	3	4	3	2	4	17,33	0,72
B1	2	1	3	3	3	2	2	2	0	12,67	0,53
B2	3	2	3	2	3	3	3	3	0	15,67	0,65
B3a	2	2	2	3	4	4	4	4	4	19,33	0,81
B3b	3	3	2	3	3	4	3	4	4	19,33	0,81
B3c	4	1	2	2	4	4	4	2	4	17,33	0,72
B3d	4	4	2	3	3	2	3	4	4	19,33	0,81
B3e	4	4	2	3	4	4	3	4	4	21,33	0,89
C1	2	3	2	4	4	3	4	2	3	17,67	0,74
C2	2	3	1	4	2	2	3	2	2	14,00	0,58
C3	4	3	3	4	1	3	1	3	3	16,67	0,69
C5a	2	3	2	3	3	4	3	2	3	16,33	0,68
C5b	3	4	2	3	3	4	3	4	3	19,67	0,82
C5c	2	3	2	2	3	2	3	2	3	14,33	0,60
D1	4	3	2	2	3	1	3	3	0	15,00	0,63
D2	2	4	2	3	3	3	4	3	2	17,67	0,74
D3	3	1	3	2	3	2	3	2	0	13,33	0,56
D4	3	1	3	3	3	3	3	3	0	15,67	0,65
E1	4	3	2	3	3	3	2	3	2	17,00	0,71
E2	4	3	3	2	3	2	3	3	2	17,00	0,71
E3	4	3	3	3	3	3	3	3	2	18,33	0,76
F1	4	1	3	3	3	4	1	3	2	16,33	0,68

4. Konzeptionierung

Als sinnvollstes Fügeverfahren mit einer Wertigkeit von 89% ergibt sich das *Dünnblechschrauben*. Eine Darstellung einer solchen Schraube sowie eines Anwendungsbeispiels ist in Abbildung 4.9 gegeben. Abbildung 4.10 zeigt die Funktionsweise. Die Vorteile des Verfahrens sind das Verschrauben ohne Vorlochung und geringer Prozessanforderungen, sowie die Verwendung von Schraubautomaten für Leichtbauroboter. Ein Beispiel für eine solche Kombination zeigt Abbildung 4.11. Ein weiterer Vorteil liegt in der guten Marktverfügbarkeit dieser Komponenten.

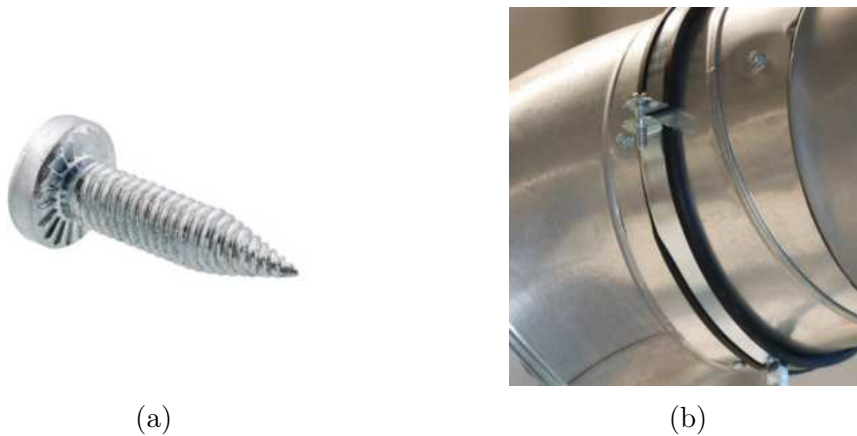


Abbildung 4.9.: Dünnblechschraube der Firma *RECA NORM GmbH* mit Anwendungsbeispiel des Herstellers [REC24].

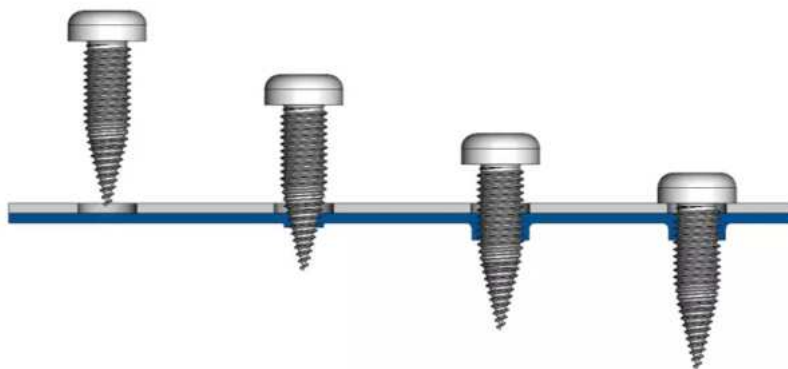


Abbildung 4.10.: Veranschaulichung der Funktionsweise einer Dünnblechschraube bei einseitiger Vorlochung der Firma *Wilhelm Böllhoff GmbH & Co. KG* [Bö24].



Abbildung 4.11.: Schraubautomat mit automatischer Schraubenzuführung an einem Leichtbauroboter der Firma *Stöger Automation GmbH* (Datenblatt im Anhang A.5) [Gmb24].

4.4. Installationsprozess

Die vorangegangenen Abschnitte thematisieren die Prozessschritte zur Installation eines Heliostaten. Die Pylone wird mittels Vibrationsrammen eingebracht. Anschließend wird der Konzentrador (mit Nachführeinheit) mit Dünnschrauben auf der Pylone gefügt. Diese bisher größtenteils unabhängig betrachteten Prozessschritte werden in diesem Abschnitt in einen Gesamtprozess eingebettet. Bauteile und Maschinen müssen im Feld sinnvoll zusammenarbeiten und sowohl einen schlanken Materialfluss wie auch kurze Taktzeiten gewährleisten. Für diese Aufgabe werden Fahrpläne und Fahrzeuge/Trägergeräte vorgestellt und Konzepte erarbeitet, wie diese effizient zusammenwirken.

Im Folgenden werden die spezifischen Anforderungen für den Installationsprozess und die Trägergeräte erläutert.

4.4.1. Anforderungen

Für den Installationsprozess und die Betriebsmittel im Allgemeinen gilt es, das Kostenoptimum pro Heliostat zu bestimmen. Um das Optimum abzuschätzen, welches sich aus den Kosten und dem Zeitbedarf zur Errichtung eines Solarfeldes ergibt, wird im Verlauf dieses Abschnitts eine Berechnung für verschiedene Konzepte anhand eines Beispielszenarios durchgeführt. Die Randbedingungen dieses Szenarios sind mit dem DLR abgestimmt und liegen in Tabelle 4.9 vor.

Der Projektzeitraum beträgt in diesem Szenario 10 Jahre, mit 200 Arbeitstagen pro Jahr und 10 Arbeitsstunden pro Tag. Für die Berechnung gilt das exemplarische Solarfeld in Abbildung 4.12.

Darüber hinaus bestehen Anforderungen an die Trägergeräte/Fahrzeuge. Die Trägergeräte müssen von den Dimensionen und der Traglast fähig sein, Maschinen und Bauteile/Komponenten zu tragen. Ein Wunsch ist, dass die Fahrzeuge automatisch bis autonom fahren, da anzunehmen ist, dass dies trotz höherer Investitionskosten durch den Entfall der Lohnkosten langfristig Kosten spart. Weiter stehen die zu installierenden Heliostaten nur wenige Meter auseinander. Daraus folgt, dass die Fahrzeuge stets im Stop-and-Go Betrieb sind. Das Fahrzeug muss hierfür ausgelegt sein. Gewünscht, aber nicht zwangsläufig notwendig, ist eine gute Manövrierbarkeit, um kleinere Wenderadien zu ermöglichen, da dies langfristig Wegstrecke spart. Von Vorteil ist auch, wenn die Trägergeräte genau steuerbar sind, so dass die aufgebauten Maschinen nicht viel Positionierungsungenauigkeit ausgleichen müssen. Aus den Umweltbedingungen von Tabelle 2.3 geht hervor, dass die Trägergeräte zwar outdoortauglich sein müssen, jedoch auf ebener planierter Fläche fahren. Die Fahrzeuge müssen daher fähig sein, Off-Highway zu operieren.

Gefordert ist weiter eine gute Transportierbarkeit der Maschinen per Schiff und LKW. Dies ist notwendig, da potentielle Solarfelder auf verschiedenen Kontinenten und Ländern errichtet werden sollen. Eine gute Transportfähigkeit ergibt sich z.B. durch die Möglichkeit des Transports in einem ISO-Container. Auch denkbar wäre, dass die Fahrzeuge selbst straßenverkehrstauglich sind.

Darüber hinaus ist die Zuverlässigkeit, die Verfügbarkeit von Ersatzteilen oder auch die Redundanz durch gleiche Trägergeräte mit flexiblen Einsatzmöglichkeiten wünschenswert, da dies die Wartung vereinfacht oder im Zweifel eines Ausfalls den fortlaufenden Betrieb ermöglicht.

Speziell für das Trägergerät der Vibrationsramme gilt die Forderung einer stabilen Lage. Damit ist gemeint, dass mögliche Schwingungen der Ramme nicht zu einem schädlichen Schwingverhalten des Fahrzeugs und die hohen Bodenkräfte nicht zu einer Neigung des Fahrzeugs führen. Dies kann beispielsweise durch ein steifes Fahrwerk oder ausfahrbare Stützen erreicht werden.

Tabelle 4.9.: Anforderungen an den Installationsprozess und die Transportmittel sowie Randbedingungen des Berechnungsszenarios (Vollständige Anforderungsliste unter Anhang A.2).

Datum	F/W	Anforderungen Installationsprozess und Materialfluss	Verantw.
Installationsprozess und Materialfluss			
Mai '24	F	Transport von Pylonen, Konzentratoren, Vibrationsramme und Schraubautomat (Dünnblechschrauben)	DLR
Mai '24	F	Effizienter, schlanker Materialfluss mit hoher Gesamtauslastung (kostensparend)	DLR
Trägergeräte/Fahrzeuge			
April '24	F	Trägergerät der Ramme: Nutzlast min. 8 t, stabile Lage zum Verhindern von Schwingungen und Neigung (z.B. steifes Fahrwerk)	L.G.
April '24	W	Automatisches Fahren	DLR
April '24	F	Optimiert für Stop-and-Go Betrieb	L.G.
April '24	W	Gute Manövrierbarkeit/genauere Steuerbarkeit	L.G.
April '24	F	Off-Highway tauglich (Vergl. Geländebedingungen Tabelle 4.9)	L.G.
Mai '24	F	Gute Transportfähigkeit durch Schiff und LKW oder selbstfahrend	L.G.
Mai '24	W	Zuverlässigkeit, Ersatzteilverfügbarkeit und/oder Redundanz (z.B. mehrere Fahrzeugen)	L.G.
Berechnungsszenario (Randbdg.)			
Mai '24	F	Projektzeitraum 10 Jahre	DLR
Mai '24	F	200 Arbeitstage pro Jahr mit je 10 Arbeitsstunden	DLR
Mai '24	F	Berechnung am Beispiel des in Abbildung 4.12 abgebildeten Solarfeldes	DLR

4.4.2. Aufbau des Solarfeldes

Zwischen 2000 und 10000 Heliostaten (hier 2838) sind pro Solarfeld zu installieren, vergleiche Kapitel 1.3. Die Stückzahl entspricht der einer kleinen Serienfertigung in einer Produktionsanlage. Analog wird ein schlanker Materialfluss und eine hohe Auslastung angestrebt. Verschiedene Fragen sind zu klären:

1. In welcher Reihenfolge werden die Heliostaten des Solarfeldes installiert und welchen Einfluss hat dies auf die Transportwege?
2. Welche Fahrzeuge für welche Aufgabe/Aufgaben (Maschinen tragen, Bauteile transportieren) wirken wie zusammen?
3. Welche expliziten Fahrzeuge/Trägergerät kommen hierfür infrage?
4. Abschließend, welches Konzept bildet das Kostenoptimum abhängig von Fahrzeuggröße, Ladekapazität, Fahrstrecken, Energieverbrauch usw.?

Zuerst wird in diesem Abschnitt die Frage der Installationsreihenfolge und der Transportwege geklärt.

Abbildung 4.12 zeigt ein Solarfeld mit 2823 Heliostaten eines Solarturmkraftwerks, an dessen Beispiel ein Konzept zur Installation entwickelt wird. Im Nullpunkt befindet sich der Solarturm des Kraftwerks. Das Feld hat ca. die Maße von 210 m mal 154 m. Die Heliostaten stehen dabei minimal 2,05 m, maximal 4,83 m und im Durchschnitt 3,11 m weit auseinander. In Abbildung 4.12 ist ersichtlich, dass die Heliostaten in unmittelbarer Nähe zum Solarturm am dichtesten stehen und sich der Abstand mit zunehmender Entfernung zum Turm erhöht. Der Turm wird im Folgenden auch als Ursprung bezeichnet, da angenommen wird, dass hier die Materialanlieferung für die Baustelle erfolgt. Auch die potentielle Endmontage der Heliostaten (siehe Kapitel 1.3) findet in dem Szenario hier statt.

Aus den Abständen folgt, dass Fahrzeuge mit einer Breite ab ca. 1,8 m in den vorderen Reihen nicht mehr zwischen den geramnten Pylonen fahren können. Aber auch in den hinteren Reihen ist der Abstand gering. Spätestens bei der Montage des Konzentrators können Fahrzeuge nicht mehr zwischen bereits installierten Heliostaten fahren. Daraus folgt, dass die Heliostaten reihenweise installiert werden müssen. Daher ist es sinnvoll, das Solarfeld von „Hinten nach Vorne“ aufzubauen. Es werden zuerst die Heliostatereihen installiert, welche sich am weitesten vom Ursprung entfernt befinden. Die Vorteile dieser Aufbaureihenfolge verdeutlicht Abbildung 4.13. Abbildung 4.13a zeigt den Aufbau vom Ursprung aus, Abbildung 4.13b zum Ursprung hin. Die blauen Pfeile stellen die Fahrrouete der Maschine beim Ausführen der Prozessschritte dar, während

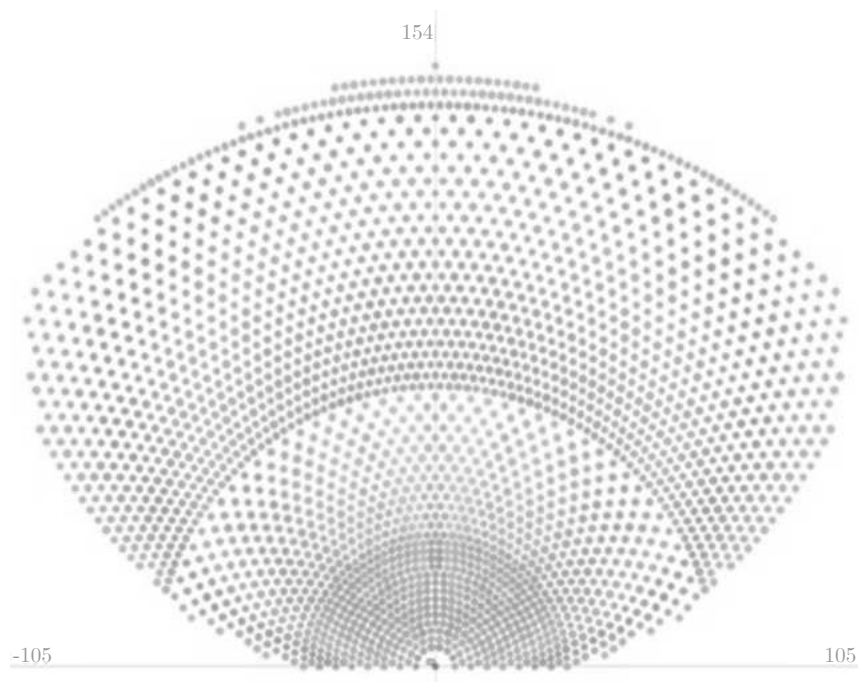
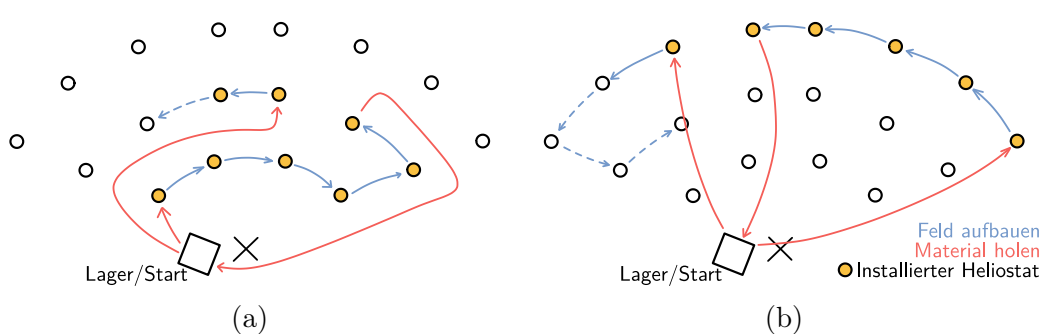


Abbildung 4.12.: Exemplarisches Solarfeld mit 2823 Heliostaten.

die roten Pfeile die Transportwege des Materialnachschubs verdeutlichen. Die kreisförmigen Marker stellen die Position der Heliostaten dar. Gelb ausgefüllte Marker stellen bereits installierte Heliostaten dar. Wird das Feld von „Hinten nach Vorne“ aufgebaut, kann der Materialnachschub über den direkten Weg (Luftlinie) erfolgen. Wird das Feld dagegen von „Vorne nach Hinten“ errichtet, ist dies nicht möglich, da die bereits installierten Heliostaten umfahren werden müssen. Für die weitere Betrachtung wird daher die Aufbaureihenfolge nach Abbildung 4.13b verwendet.

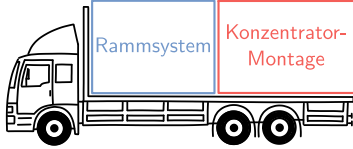
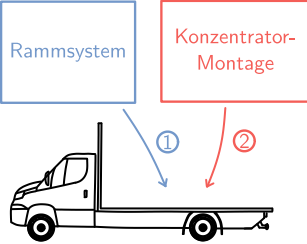
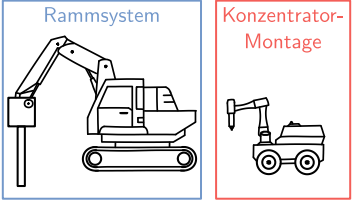
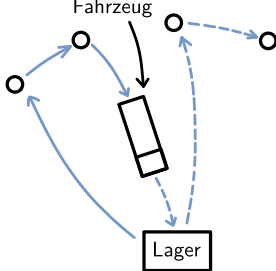
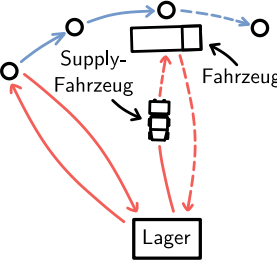
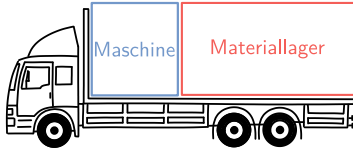
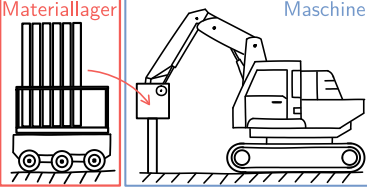
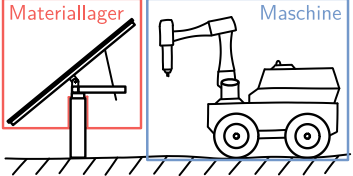
Abbildung 4.13.: Veranschaulichung des Vorteils des Aufbaus von *Hinten nach Vorne* (a) gegenüber des Aufbaus von *Vorne nach Hinten* (b).

4.4.3. Entwicklung des Gesamtprozess

Einerseits müssen die für die Prozessschritte benötigten Maschinen transportiert werden, andererseits die Bauteile der Heliostaten. Vor dem Kontext der Stückzahl kann der Materialfluss ähnlich wie in einer stationären Produktion betrachtet werden, mit dem Unterschied, dass es kein festes Anlagenlayout gibt. Die Produktionsmaschinen sind mobil. Es gelten die grundsätzlichen Gestaltungsregeln der Logistik. Das richtige Material muss in der richtigen Menge am richtigen Ort zur richtigen Zeit sein.

Unterschiedliche Konfigurationen von Transportmitteln und Maschinen sind vorstellbar. Denkbar wäre beispielsweise ein autonom fahrender LKW, welcher eine Vibrationsramme, ein Magazin zur Lagerung der Pylonen und Handhabungseinrichtungen zur Zuführung trägt. Denkbar wäre allerdings auch ein kleines Raupenfahrzeug als Trägergerät für eine Vibrationsramme, welches von kleineren Flurförderfahrzeugen einzeln mit Material im Sinne eines Quasi-Stetigförderers Just-in-time beliefert wird. Für die Konzentratormontage verhält sich dies analog. Schlüsselte man diese Beispiele nach ihren Funktionen auf, so ergeben sich die in Tabelle 4.10 zu findenden Optionen. Die Maschinen zur Durchführung der Installationsprozessschritte müssen transportiert werden. Es ergibt sich die Funktion *Maschinenträger*. 2823 Heliostaten müssen pro Solarfeld installiert werden. Es ist offensichtlich, dass ein Fahrzeug nicht die gesamte Menge der zu installierenden Bauteile mit sich führen kann. Das Fahrzeug muss demnach neu beladen, oder beliefert werden. Es ergibt sich die Funktion *Ort der Bestückung*. Weiter stellt sich die Frage, ob der Maschinenträger auch die Heliostatkomponenten trägt. Das Material kann auch auf einem externen Fahrzeug gelagert, oder im Feld abgelegt werden. Es ergibt sich die Funktion *Ort der Lagerung*.

Tabelle 4.10.: Morphologischer Kasten zur Konzeptfindung der Installations-/Materialflusskonzepte.

Funktion	1	2	3
A Maschinenträger	 <p>Universal Fahrzeug</p>	 <p>Modulares Fahrzeug</p>	 <p>Spezialfahrzeug</p>
B Ort der Bestückung	 <p>Im Hauptlager</p>	 <p>Im Feld durch Supply-Fahrzeug</p>	
C Ort der Lagerung	 <p>Auf Maschinenträger</p>	 <p>Auf Supply-Fahrzeug</p>	 <p>Im Feld (abgelegt)</p>

4. Konzeptionierung

Im Folgenden werden die verschiedenen Optionen erläutert. Anschließend werden Lösungspfade gebildet. Diese liegen in Tabelle 4.11 vor.

A Maschinenträger

- A1** *Universal Fahrzeug* – Alle notwendigen Maschinen, Lager, Handhabungs-/Zuteileinrichtungen, welche für den Rammprozess sowie für die Konzentration-Montage notwendig sind, befinden sich auf einem entsprechend großen Fahrzeug. Es wird eine Pylone gerammt und anschließend der Konzentration auf dieser installiert, bevor der nächste Heliostat errichtet wird.
- A2** *Modulares Fahrzeug* – Es existiert ein Fahrgestell mit Motor, Steuerung und Sensorik zum automatischen Fahren. Die Aufbauten werden jedoch nach Bedarf umgerüstet, beispielsweise durch verschiedene ISO-Container mit entsprechenden Einbauten. In einem ersten Arbeitsgang können so die Pylone gerammt werden. Anschließend wird das Fahrzeug umgerüstet und es erfolgt die Heliostat-Montage.
- A3** *Spezialfahrzeug* – Es gibt verschiedene Fahrzeuge für die verschiedenen Prozessschritte. Diese können unabhängig voneinander arbeiten.

B Ort der Bestückung

- B1** *Im Hauptlager* – Das Fahrzeug mit der Maschine (der Maschinenträger) fährt selbstständig zurück zum Hauptlager (Ort der Materialanlieferung und Endfertigung), um neu beladen zu werden.
- B2** *Im Feld* – Der Maschinenträger fährt nicht zurück ins Hauptlager. Stattdessen transportiert ein oder mehrere Supply-Fahrzeuge das Material ins Feld/zum Maschinenträger.

C Ort der Lagerung

- C1** *Auf Maschinenträger* – Das Material wird direkt auf dem Maschinenträger gelagert, unabhängig davon, ob dieser direkt im Hauptlager bestückt wird oder durch ein Supply-Fahrzeug beliefert wird. In letzterem Fall übergibt das Supply-Fahrzeug eine Transporteinheit (Ladungsträger mit Ladung) an den Maschinenträger.
- C2** *Auf Supply-Fahrzeug* – Das Supply-Fahrzeug wird im Hauptlager bestückt und transportiert die Bauteile zum Maschinenträger. Allerdings findet keine Übergabe einer Transporteinheit oder ähnlichem statt. Stattdessen entnimmt die Maschine im Feld direkt ein Bauteil vom Supply-Fahrzeug, welches dem Maschinenträger folgt.

- C3** *Im Feld* – Die Bauteile werden von einem Supply-Fahrzeug im Feld an der Stelle abgelegt, an der sie benötigt werden. Die Maschine auf dem Maschinenträger nimmt dieses Bauteil anschließend zur Weiterverarbeitung auf.

Als Maschinenträger wird an dieser Stelle eine Vorauswahl getroffen. Wie bereits in Abschnitt 4.4.2 beschrieben, ist die Breite der Fahrzeuge auf 1,8 m limitiert, um zwischen den geramnten Pylonen der vordersten Reihen zu fahren. Bei einem modularen Fahrzeug (A2) führt dies zu einem Problem, da erst alle Pylonen gerammt werden müssen, bevor die Konzentratoren installiert werden können. Zudem ist anzunehmen, dass das modulare Trägergerät breiter als 1,8 m ist, da für den Betrieb der Vibrationsramme eine hohe Traglast und Steifigkeit erforderlich ist. Auch muss eventuell ein Hydraulikgenerator zum Betrieb verbaut sein. Wird dann noch Material mitgeführt, steigt die Größe des Fahrzeugs weiter. Ein ISO-Container hat beispielsweise eine Breite von 2 352 mm. Das Konzept ist daher realistisch nicht anwendbar. Zudem wird ein schweres Fahrzeug zwar für den Rammprozess benötigt, jedoch nicht für die Konzentrator-Montage. Der Energieverbrauch des modularen Fahrzeugs wäre somit für die Konzentrator-Montage unverhältnismäßig hoch.

Für das Universalfahrzeug (A1) gilt ähnlicher Zusammenhang hinsichtlich des Energieverbrauchs. Um alle notwendigen Einrichtungen für beide Prozessschritte auf einem Fahrzeug mitzuführen, müsste dieses relativ groß sein. Zudem erhöht sich die Taktzeit. Während zwei Spezialfahrzeuge (A3) nahezu parallel arbeiten könnten, kann das Universalfahrzeug dies nicht. Da die Abstände der Heliostaten nicht konstant sind, könnte das Universalfahrzeug nur mit großem technischen Aufwand so gestaltet werden, dass im vorderen Fahrzeugbereich z.B. die Pylone gerammt und im hinteren Bereich zeitgleich der Konzentrator auf einer zuvor geramnten Pylone montiert wird. Die Taktzeit beider Prozessschritte summiert sich daher. Dagegen wird angenommen, dass zwei Spezialmaschinen doppelt so schnell arbeiten können. Weiter kann angenommen werden, dass durch die unterschiedlichen Anforderungen der Prozesse an die Maschinenträger die Spezialfahrzeuge unterschiedlich beschaffen sind. Es ist wahrscheinlich, dass der Leichtbauroboter mit Schraubautomat günstiger in der Anschaffung ist, als ein Rammfahrzeug. Eine Halbierung der Taktzeit führt in diesem Fall also nicht zu doppelten Kosten. Dies gilt nicht für ein Universalfahrzeug. Zudem sinkt die Manövrierbarkeit, siehe Tabelle 4.9, mit steigender Fahrzeuggröße.

Es werden daher nur Lösungspfade, siehe Tabelle 4.11, mit dem Konzept *Spezialfahrzeug* (A3) gebildet. Alle nachfolgenden Konzepte gehen daher von zwei parallel arbeitenden Spezialfahrzeugen aus. Hinsichtlich der Konzepte sind die Prozessschritte unabhängig voneinander zu betrachten, da nicht aus-

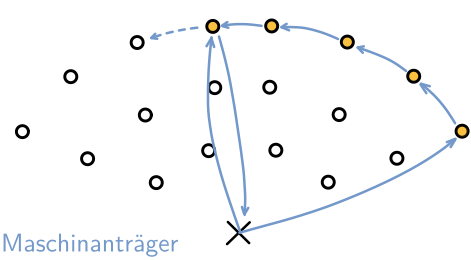
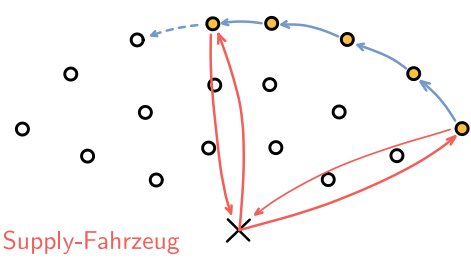
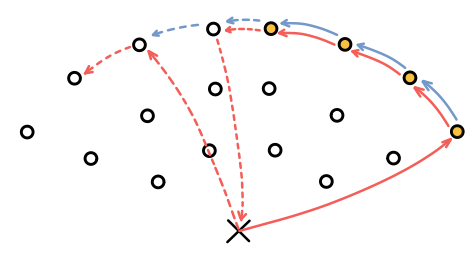
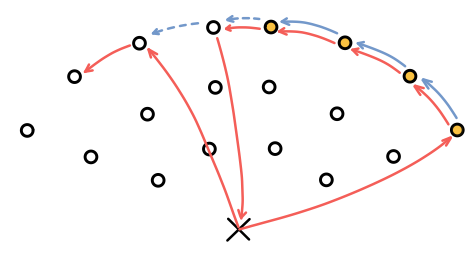
4. Konzeptionierung

geschlossen werden kann, dass das Kostenoptimum für den Rammprozess und die Konzentratormontage mit unterschiedlichen Konzepten erreicht wird. Dies könnte zum Beispiel dadurch bedingt sein, dass auf den gleichen Bauraum beträchtlich mehr Pylone als Konzentratoren gelagert werden können.

Jedes Lösungskonzept (Tabelle 4.11) bietet Vor- und Nachteile, welche schwierig hinsichtlich des Kostenoptimums zu bewerten sind. So ist bei Konzept I kein weiteres Fahrzeug neben dem Maschinenträger notwendig. Dafür pausiert der Prozessschritt während das Fahrzeug zurück zum Hauptlager fährt, um neu beladen zu werden. Die Auslastung dieser Maschine sinkt. In Konzept II ist die Auslastung der Maschine höher, da die Maschine nicht zum Hauptlager zurück fährt, sondern von einem Supply-Fahrzeug beliefert wird. Dies erhöht jedoch die Investitions- und Betriebskosten. Da die Bauteile in Konzept II nach wie vor auf den Maschinenträger geladen werden, entsteht je nach Ausgestaltung und Größe des Ladungsträgers eventuell dennoch eine kurze Pause im Betrieb. In Konzept III wird kein Ladungsträger übergeben. Das Supply-Fahrzeug folgt der Maschine als mobiles Lager. Je nach Konstruktion entstehen keine größeren Nachladezeiten als bei einem Lager auf dem Maschinenträger direkt. So kann ein Roboter beispielsweise über den Maschinenträger hinauskragen und Material aus dem mobilen Lager entnehmen. Nachteilig ist jedoch, dass das Supply-Fahrzeug erst dann zurückfahren kann, um neu beladen zu werden, wenn das gesamte Material verbraucht ist. Um Wartezeiten im Betrieb zu verhindern, sind demnach mindestens 2 Fahrzeuge notwendig. Konzept IV entkoppelt die Maschine von dem Supply-Fahrzeug. Beide Fahrzeuge agieren unabhängig, wodurch solange keine Verzögerungen im Prozess entstehen, solange das Supply-Fahrzeug schneller Material ablegt, als die Maschine verarbeitet. Dafür müssen Möglichkeiten geschaffen werden, das Material im Feld zu lagern, beispielsweise mit einem Ladungsträger. Dieser muss dann auch wieder eingesammelt werden. Zudem muss die Maschine das Material auch aufnehmen.

Bevor in Abschnitt 4.4.5 dieses Kapitels das Kostenoptimum mittels einer Szenarioberechnung bestimmt wird, werden im folgenden Abschnitt geeignete Trägergeräte bzw. Fahrzeuge beschrieben.

Tabelle 4.11.: Lösungspfade gebildet aus den in Tabelle 4.10 gezeigten Teillösungen – dargestellt als abstrahierte Fahrrouten.

I A3 – B1 – C1		<p>In diesem Konzept führt eine Maschine mit aufgebautem Lager den jeweiligen Prozessschritt aus und fährt zurück ins Hauptlager sobald das Material verbraucht ist, um dort neu beladen zu werden.</p>
II A3 – B2 – C1		<p>In diesem Konzept arbeitet die Maschine konstant, wodurch eine hohe Auslastung erreicht wird. Ein Supply-Fahrzeug beliefert die Maschine und übergibt das Material. Das Supply-Fahrzeug fährt direkt zurück um den Vorgang zu wiederholen.</p>
III A3 – B2 – C2		<p>Dieses Konzept ähnelt dem vorigen. Allerdings wird das Material nicht an die Maschine übergeben. Stattdessen fährt das Supply-Fahrzeug parallel zur Maschine und fungiert quasi als mobiles Lager.</p>
IV A3 – B2 – C3		<p>Auch hier wird die Maschine durch ein Supply-Fahrzeug unterstützt. Allerdings beliefert das Supply-Fahrzeug nicht die Maschine mit Material, sondern legt dieses an der Position im Solarfeld ab, an der es später verarbeitet wird. Supply-Fahrzeug und Maschine arbeiten unabhängig voneinander.</p>

4.4.4. Fahrzeuge und Trägergeräte

Für den Transport von Maschinen und Bauteilen werden geeignete Fahrzeuge vorgestellt. Hierbei wird in Maschinenträger und Supply-Fahrzeuge unterschieden.

Maschinenträger

Für das Rammen der Pylone sind im Rahmen der Systemanalyse in Kapitel 4.2 bereits mögliche Trägergeräte aufgeführt.

Die ausgewählte Ramme erfordert ein Baggergewicht von 8 bis 18t. Daraus lässt sich ableiten, dass auch andere Fahrzeuge zum Betrieb der Ramme ein ähnliches Gewicht aufweisen müssen, vergl. Abbildung A.4 *Datenblätter*. Darüber hinaus müssen ggf. ein Hydraulikgenerator, ein Materiallager und Handhabungseinrichtungen aufgebaut werden. Infrage kommen daher nur größere bzw. schwerere Fahrzeuge. Zur Auswahl stehen hier LKW und Bagger verschiedenster Größen sowie Raupenfahrgestelle. Raupenfahrgestelle werden von verschiedenen Herstellern zum Aufbau eigener Maschinen angeboten, siehe Abbildung 4.17. Ein Beispiel für solche Aufbauten sind die bereits vorgestellten Solar Pile Driver mit Schnellschlagramme, siehe Abbildung 4.16. Solar Pile Driver werden von verschiedenen Herstellern angeboten und sind auch teilweise ferngesteuert verfügbar, was eine Automatisierung vereinfacht. LKW und Bagger sind in der Regel nicht vollautonom verfügbar. Allerdings gibt es Firmen, welche sich darauf spezialisiert haben, Serienfahrzeuge für verschiedenste Anwendungen zu automatisieren, z.B. die Firma *Götting KG*, siehe Abbildung 4.14. Zusammengefasst gibt es folgende Optionen:

- LKW verschiedener Größen
- Hydraulikbagger
- Eigenbau auf Basis eines Raupenfahrwerks

Für die Konzentration-Montage streut sich die Auswahl an potentiellen Fahrzeugen mehr. Das ausgewählte Fügeverfahren der Dünnblechschraube mit einem Schraubautomat erfordert kein hohes Fahrzeuggewicht. Je nachdem ob ein Materiallager und Handhabungseinrichtungen aufgebaut werden, kann die Größe der Fahrzeuge stark variieren. So kann beispielsweise im Fall von Konzept I (Maschinenträger mit Materiallager) ebenfalls ein LKW zum Einsatz kommen. Im Fall von Konzept IV dagegen kann z.B. auch ein kleines unbemanntes Landfahrzeug, engl. unmanned ground vehicle (UGV), bzw. ein outdoor-fähiges fahrerloses Transportfahrzeug (FTF) verwendet werden. Viele

4.4. Installationsprozess



Abbildung 4.14.: Autonomer LKW der Firma *Götting KG* [KG12].



Abbildung 4.15.: Bagger mit freireitender Vibrationsramme der Firma *Skancraft* [Ska24].

4. Konzeptionierung



Abbildung 4.16.: Ferngesteuerter Solar Pile Driver der Firma *Orteco* [Paj23].



(a)



(b)

Abbildung 4.17.: Stahlraupenfahrwerk der Firma *Himowa* (a) [Him24] und Hydraulikaggregat der Firma *VTS Track Solutions* (b) [Sol24b].

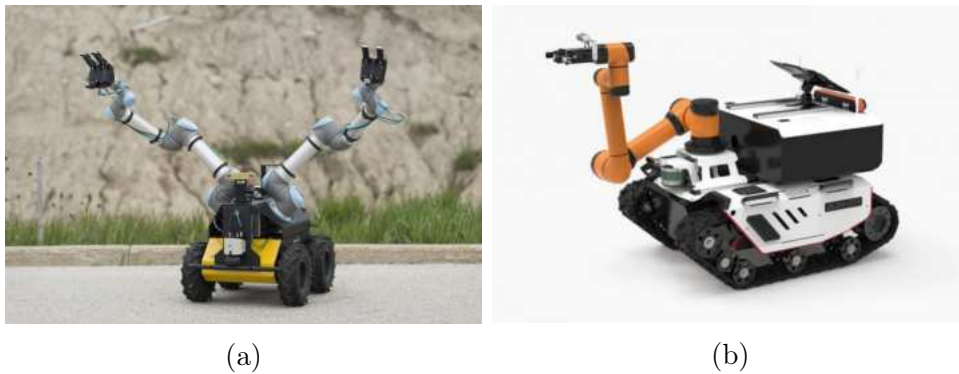


Abbildung 4.18.: UGVs mit Gelenkarmroboter der Firma *Clearpath Robotics* (a) [Rob24b] und der Firma *AgileX Robotics* (b) [Rob24a].

Fahrzeuge diverser Hersteller sind am Markt verfügbar, siehe Abbildung 4.18. Die folgenden Fahrzeuge kommen in Frage:

- LKW verschiedener Größen
- UGVs verschiedener Größen
- Eigenbau auf Basis eines Raupenfahrwerks

Supply-Fahrzeuge

Die Konzepte II bis IV erfordern mindestens ein Supply-Fahrzeug. Die Beschaffenheit dieses Fahrzeuges ist abhängig von der Art und Anzahl der Bauteile, die transportiert werden sollen. Wird als Maschine z.B. ein 40t-LKW verwendet, erscheint es sinnvoll, diesen mit einer großen Menge an Bauteilen zu bestücken, z.B. durch die Übergabe eines 20-Fuß ISO-Container als Ladungsträger. Für dieses Beispiel wäre demnach ein Greifstapler, engl. Reachstacker, erforderlich, siehe Abbildung 4.19. Wird dagegen ein kleines UGV in kurzen Zyklen mit einer kleinen Menge an Bauteilen beliefert, können auch die Supply-Fahrzeuge kleiner sein. Zwischen diesen Extremen ergeben sich viele Abstufungen. Als mobiles Lager sind beispielsweise auch autonome Container-Transporter möglich, wie sie in Häfen verwendet werden, siehe Abbildung 4.20. Für Konzept IV (Material im Feld ablegen) ist auch eine Transportflugdrohne denkbar, siehe Abbildung 4.21. Es ergeben sich folgende Möglichkeiten:

- UGV
- Routenzug (Abbildung 4.22)

4. Konzeptionierung



Abbildung 4.19.: Greifstapler der Firma *Feyter Iberia* [Ibe23].

- Autonomer/Manueller Stapler (Abbildung 4.23)
- Autonomer Container-Transporter
- Greifstapler
- Transportflugdrohne

Für diese Fahrzeuge ist es schwierig, die Investitionskosten zu ermitteln. Auch die Energieverbräuche sind seitens der Hersteller häufig nicht gegeben. Wartungskosten sind ebenfalls schwierig abzuschätzen. Es werden daher zusammen mit dem DLR sinnvolle Annahmen getroffen.

Für die Abschätzung der genannten Daten wurde auch das Tool der Chatbots verwendet. Verwendet wurden ChatGPT mit Sprachmodell GPT-4/GPT-4o der Firma *OpenAI* und *perplexity.ai* mit Sprachmodell GPT-4o der Firma *Perplexity AI, Inc.*. Die Daten wurden durch Recherchen auf Portalen für gebrauchte Maschinen und Abschätzung des Neupreises validiert.

Die angenommenen Daten für die Szenarioberechnung liegen im Anhang unter Abschnitt A.6 vor.

4.4. Installationsprozess



Abbildung 4.20.: Container-Transporter der Firma *Konecranes* [Kon24].



Abbildung 4.21.: Transportdrohne der Firma *DJI* mit 30 bis 40 kg Nutzlast [DJI24].

4. Konzeptionierung



Abbildung 4.22.: Autonomer outdoortauglicher Routenzug der Firma *Innoks Robotics* [Rob24c].

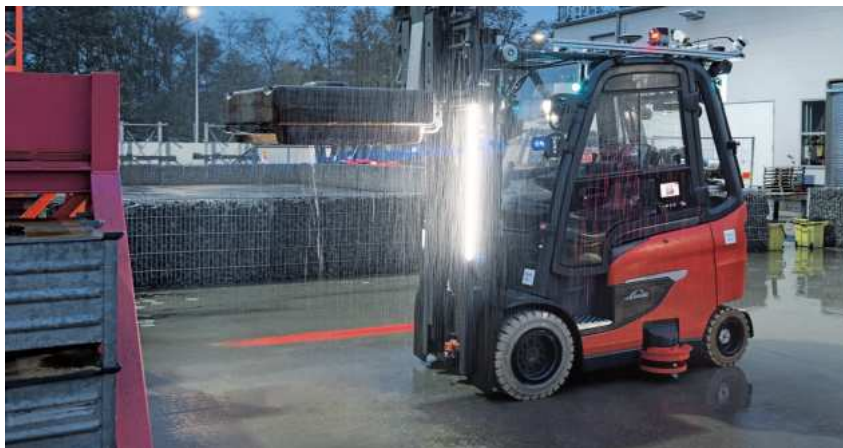


Abbildung 4.23.: Stapler der Firma *Linde* umgerüstet zum autonomen Betrieb durch die Firma *Kion Group AG* [AG24b].

4.4.5. Szenarioberechnung

Nach dem die Konzepte zum Prozessablauf/Materialfluss und geeignete Fahrzeuge bestimmt wurden, wird das Kostenoptimum der Konzepte I bis IV mit verschiedenen Fahrzeugen ermittelt. Das Ziel der Berechnung sind die Kosten pro Heliostat der einzelnen Konfigurationen. Das Rammen der Pylone und die Konzentrador-Montage werden bei der Berechnung getrennt betrachtet. Die Vorgehensweise wird im Folgenden allgemein erklärt.

Um die Kosten pro Heliostat zu berechnen, werden die Gesamtkosten eines Konzepts durch die Anzahl der Heliostaten dividiert, welche in dem angesetzten Projektzeitraum (siehe Tabelle 4.9) installiert werden können. Die Gesamtkosten eines Konzepts über den Projektzeitraum setzen sich aus den Investitions- und Betriebskosten zusammen. Während die Investitionskosten für den gesamten Zeitraum gelten, werden die Betriebskosten für ein einzelnes Solarfeld bestimmt. Nach der Bestimmung der maximal zu installierenden Solarfelder über den Projektzeitraum, werden die Betriebskosten mit dieser Anzahl multipliziert. Je Konzept werden daher zunächst die Betriebskosten und der Zeitbedarf zur Installation für ein Solarfeld bestimmt.

Um die genannten Größen zu ermitteln, sind Wegstrecken und Fahrzeiten zu bestimmen. Zudem müssen Taktzeiten und Übergabezeiten zur Beladung abgeschätzt werden. Auch wenn die Konzepte verschieden sind, gibt es grundsätzliche Gemeinsamkeiten bei der Berechnung. Diese werden im Folgenden erläutert.

Unabhängig der Fahrzeuge und des Installations-/Materialflusskonzepts werden die zu fahrenden Wegstrecken durch den Abstand zweier Koordinatenpunkte bestimmt, siehe Gleichung (4.1) (allgemein). Die Koordinaten der einzelnen Heliostaten des Solarfeldes in Abbildung 4.12 sind vom DLR gegeben. Vereinfachend werden in der Realität auftretende mögliche Wenderadien und mögliche Fahrmanöver vernachlässigt.

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (4.1)$$

Grundsätzlich wird der Abstand von Heliostat zu Heliostat und der Abstand zwischen Heliostat und Ursprung (Hauptlager) bestimmt. Die Strecke zwischen den Heliostaten wird zurückgelegt, wenn ein Fahrzeug einen Heliostaten bzw. eine Komponente installiert hat und zum nächsten Heliostaten fährt. Die Wegstrecke zwischen Heliostat und Ursprung wird zurückgelegt, wenn neue Bauteile geholt werden. Das beschriebene Berechnungsprinzip wird in Abbildung 4.24 veranschaulicht.

Für die einzelnen Wegstrecken wird die Fahrzeit der entsprechenden Fahrzeuge berechnet. Diese sind abhängig von der Beschleunigung und Geschwindigkeit der Fahrzeuge, wobei beides als konstant angenommen wird. Bei dem

4. Konzeptionierung

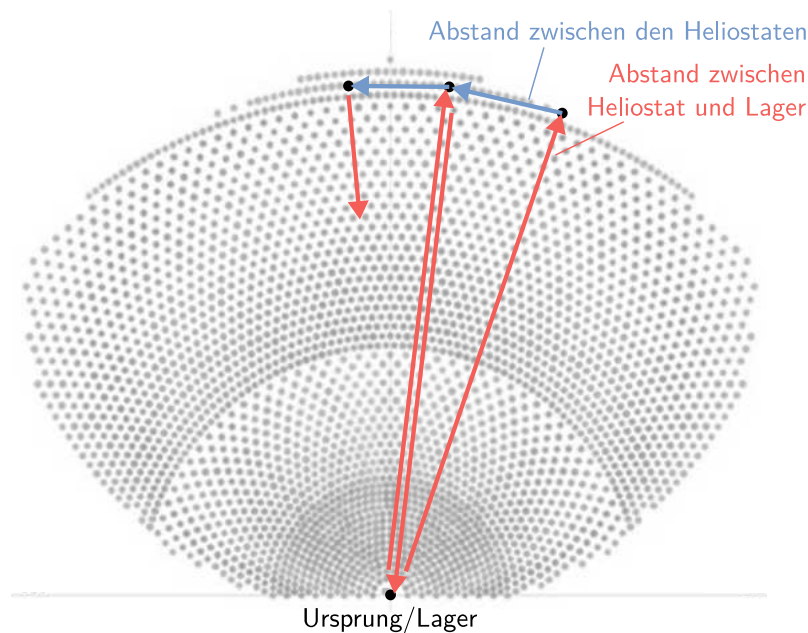


Abbildung 4.24.: Allgemeine Veranschaulichung des Berechnungsprinzips der Wegstrecken nach Gleichung (4.1).

Beschleunigungs- und Abbremsvorgang handelt es sich demnach um eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Das qualitative Geschwindigkeitsprofil ist in Abbildung 4.25 veranschaulicht.

Neben den Fahrzeiten ergeben sich weitere Zeiten im Prozess:

Taktzeit Zeit, die benötigt wird, um einen Prozessschritt der Installation pro Heliostat auszuführen.

Beladezeit Zeit, die benötigt wird, um ein Fahrzeug mit Bauteilen aus dem Lager zu beladen.

Übergabezeit Zeit, die benötigt wird, Bauteile von einem auf ein anderes Fahrzeug zu laden.

Wartezeit Zeit, welche sich aus Störungen im Prozessablauf ergeben.

Ladezeit Zeit, welche bei Elektrofahrzeugen berechnet wird, wenn die Reichweite/Laufzeit erreicht ist und der Akku aufgeladen werden muss.

Wartezeiten entstehen, wenn beispielsweise die Maschine zum Rammen der Pylone alle Pylonen gerammt hat, das gesamte Material verbraucht hat und noch keine neuen Pylonen vom Supply-Fahrzeug erhalten hat. Die Entstehung

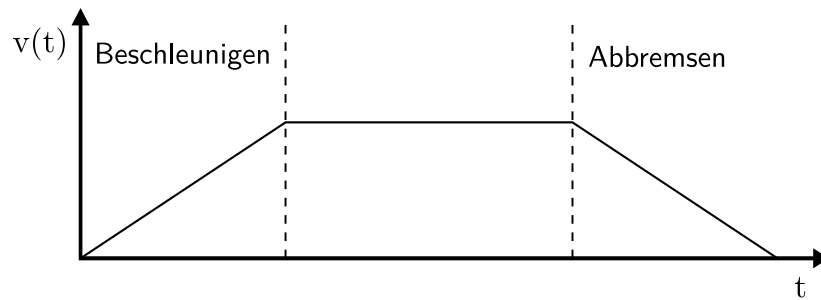


Abbildung 4.25.: Qualitative Darstellung des Bewegungsprofils aller Fahrzeuge im Rahmen der Szenarioberechnung.

von Wartezeiten ist konzeptabhängig und wird mit anderen Besonderheiten nachfolgend erläutert.

Konzept I

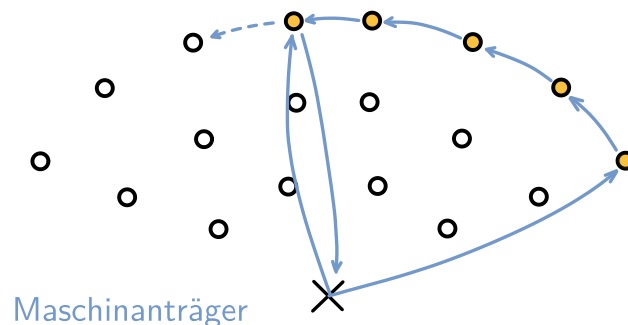


Abbildung 4.26.: Konzept I veranschaulicht als Fahrroute nach Tabelle 4.11.

In diesem Konzept gibt es nur ein Fahrzeug, den Maschinenträger. Dieses wird im Hauptlager beladen. Die Wegstrecke ergibt sich aus den Abständen der Heliostaten zueinander und dem Abstand zwischen Heliostat und Lager, wenn das Fahrzeug neu beladen wird. Die Fahrzeit ergibt sich aus den Wegstrecken. Je Heliostat wird die Taktzeit und je Beladevorgang die Beladezeit der Fahrzeit hinzugerechnet.

4. Konzeptionierung

Konzept II

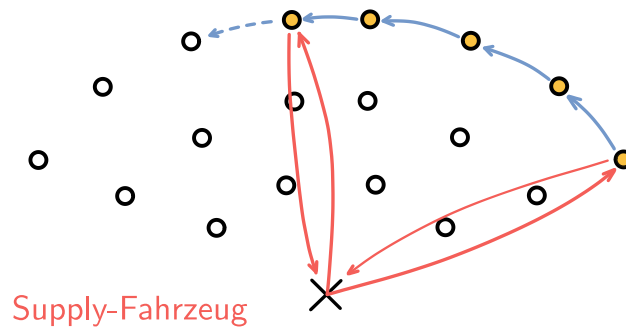


Abbildung 4.27.: Konzept II veranschaulicht als Fahrroute nach Tabelle 4.11.

In diesem Konzept kommen zwei Fahrzeugklassen zum Einsatz, der Maschinenträger und das Supply-Fahrzeug. Die Wegstrecken und Fahrzeiten werden getrennt berechnet. Die Wegstrecke des Maschinenträgers setzt sich aus den Abständen zwischen den Heliostaten zusammen. Die Wegstrecke des belieferten Supply-Fahrzeugs setzt sich aus dem doppelten Abstand (Hin- und Rückweg) zwischen Lager und dem Heliostaten zusammen, an welchem der Maschinenträger beliefert wird. Zur Fahrzeit des Maschinenträgers wird die Taktzeit und zur Fahrzeit des Supply-Fahrzeugs die Belade- und Übergabezeit addiert. Eine Wartezeit wird dem Maschinenträger berechnet, wenn die Bauteile verbraucht sind, bevor neue Bauteile von einem Supply-Fahrzeug geliefert werden. Dieser Fall tritt ein, wenn die Fahrzeit des Supply-Fahrzeugs inklusive der Belade- und Übergabezeit länger ist, als die Fahrzeit des Maschinenträgers inklusive der Taktzeit (für die Anzahl der geladenen Bauteile).

Konzept III

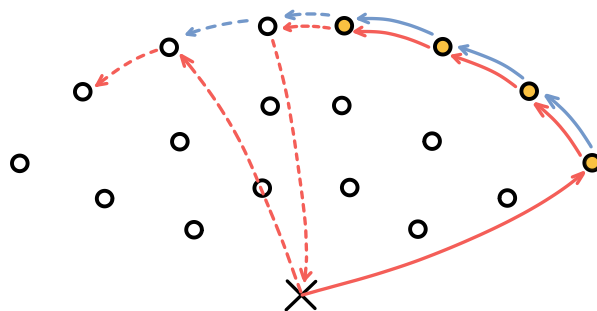


Abbildung 4.28.: Konzept III veranschaulicht als Fahrroute nach Tabelle 4.11.

Auch in diesem Konzept gibt es die Fahrzeugklassen Maschinenträger und Supply-Fahrzeug. Die Wegstrecke und Fahrzeit (inkl. Taktzeit) berechnet sich analog zu Konzept II. Das Supply-Fahrzeug dient hier als mobiles Lager, welches dem Maschinenträger folgt. Entsprechend gleicht der eine Teil der Fahrzeit des Supply-Fahrzeugs der Fahrzeit des Maschinenträgers (für Wegstrecke zwischen den Heliostaten). Der andere Teil der Fahrzeit folgt aus der Wegstrecke zwischen dem Heliostaten, an dem das Material verbraucht ist, und dem Lager, sowie dem Rückweg zum Maschinenträger. Zudem wird eine Beladezeit berechnet. Der Maschinenträger fährt in der Zwischenzeit bereits zum nächsten Heliostaten und wartet dort auf das Supply-Fahrzeug. Aus diesem Umstand ergibt sich folglich auch die berechnete Wartezeit, welche der Fahrzeit des Maschinenträgers hinzugezählt wird. Es ist ersichtlich, dass Wartezeiten nur dann vermieden werden können, wenn mindestens zwei Supply-Fahrzeuge im Einsatz sind.

Eine Übergabezeit wird nicht berechnet, da angenommen wird, dass die Entnahme eines Bauteils vom Supply-Fahrzeug ähnlich viel Zeit benötigt wie die Entnahme aus einem Onboard-Lager. Diese Zeit wird mit der Taktzeit abgeschätzt.

Konzept IV

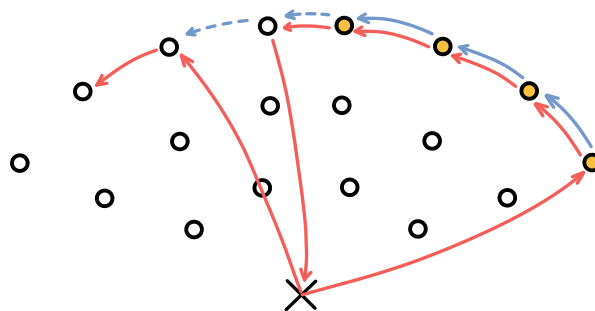


Abbildung 4.29.: Konzept IV veranschaulicht als Fahrroute nach Tabelle 4.11.

In diesem Konzept sind der Maschinenträger und das Supply-Fahrzeug voneinander entkoppelt. Die Fahrzeit des Maschinenträgers ergibt sich analog zu Konzept II und III. Die Wegstrecke des Supply-Fahrzeugs entspricht der Wegstrecke des Supply-Fahrzeugs in Konzept III. Es werden die Abstände zwischen den Heliostaten berechnet, sowie der Weg zum Lager und zurück. Zur Berechnung der Fahrzeit werden anders als in Konzept III auch für die Strecken zwischen den Heliostaten die eigene Beschleunigung und Geschwindigkeit verwendet. Der Fahrzeit hinzugerechnet wird die Beladezeit pro Beladevorgang

4. Konzeptionierung

und eine Ablagezeit (Übergabezeit) für ein Bauteil je Heliostat. Eine Wartezeit des Maschinenträgers entsteht dann, wenn dieser schneller Bauteile verarbeitet, als das Supply-Fahrzeug ablegt. Das Supply-Fahrzeug muss sozusagen vorausseilen.

Die Aufnahme eines leeren Ladungsträger wird vereinfachend nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, keinen zur Ablage zu benötigen.

Berechnung der Kosten pro Heliostat

Die Fahrzeit des Maschinenträgers inklusive aller anderweitig anfallenden Zeiten wie etwa Wartezeiten ergibt die Zeit, welche benötigt wird, das Solarfeld mit dieser Fahrzeugkonfiguration und dem zugehörigen Installationskonzept aufzubauen.

Die Investitionskosten ergeben sich aus den Anschaffungskosten der für ein Konzept benötigten Fahrzeuge. Wartungs- und Reperaturkosten werden abgeschätzt, indem pro Jahr eine Pauschale von 10 % der Investitionskosten bei Dieselfahrzeugen und 7,5 % bei Elektrofahrzeugen angenommen wird.

Die Betriebskosten pro Solarfeld ergeben sich aus den Energiekosten und Lohnkosten. Die Energiekosten ergeben sich aus dem Energieverbrauch für die zurückgelegten Kilometer der Fahrzeuge bzw. der Betriebszeit (je nach Fahrzeugtyp und Betriebsart). Es wird 1,50 € pro Liter Diesel und 0,30 € pro kWh (Stand 2024) angenommen.

Die Lohnkosten ergeben sich bei einigen Konzepten aus den Fahrzeiten des Supply-Fahrzeugs, wenn dieses nicht autonom fährt, z.B. bei einem konventionellen Gabelstapler. Der Stundenlohn wird mit 15€ abgeschätzt, da von Niedriglohnländern ausgegangen wird.

Es ergeben sich die folgenden Zusammenhänge:

$$\text{Anz. d. Solarfelder} = \frac{\text{Projektzeitraum}}{\text{Installationszeit pro Solarfeld}} \quad (4.2)$$

$$\text{Anz. d. Heliostate} = \text{Anz. d. Solarfelder} \cdot \text{Anz. d. Heliost. pro Solarfeld} \quad (4.3)$$

$$\text{Betriebskosten} = \text{Betriebskosten pro Solarfeld} \cdot \text{Anz. d. Solarfelder} \quad (4.4)$$

$$\text{Installationskosten pro Heliostat} = \frac{\text{Investitionskosten} + \text{Betriebskosten}}{\text{Anz. d. Heliostate}} \quad (4.5)$$

4.4.6. Auswertung der Berechnung

Die Ergebnisse der Berechnung sind in Abbildung 4.30 veranschaulicht. Es ist ersichtlich, dass einige Konzepte im Allgemeinen unabhängig der zum Einsatz kommenden Fahrzeuge zu niedrigeren Kosten pro Heliostat führen. Die Kosten pro Heliostat für das Montieren des Konzentrators variieren zwischen 0,23 € und 1,88 €. Durchschnittlich sind die Kosten bei Anwendung von Konzept IV am niedrigsten. Anders verhält es sich bei dem Rammen der Pylone. Da hier größere Maschinen notwendig sind und auch der Energieverbrauch höher ist, sind die Kosten pro Heliostat höher. Die Kosten liegen zwischen 1,15 € und 1,84 €. Die niedrigsten Kosten werden knapp mit Konzept I gefolgt von Konzept II erreicht.

Da es sich nur um grob abgeschätzt Eingangsdaten für die Berechnung handelt, kann nicht davon ausgegangen werden, dass die berechneten Kosten die Realität genau abbilden. Allerdings ist ein Trend erkennbar, welches Konzept für welchen Prozessschritt angewendet werden sollte. Dies liegt zum einen daran, dass konzeptübergreifend die Annahmen abgeschätzt und viele verschiedene Fahrzeugkonfigurationen berechnet wurden, wobei sich eine Tendenz zeigt. Zum anderen hat sich beim Anpassen der Annahmen über den Verlauf der Ausarbeitung diese Tendenz als robust gezeigt. Einzelne Anpassungen haben demnach nicht zu einer grundsätzlichen Verschiebung zwischen den Konzepten geführt.

Für die folgende Detaillierung wird daher Konzept IV für die Konzentrator-Montage und Konzept I für das Rammen der Pylone ausgewählt, welches für diese im Mittel das jeweilige Kostenoptimum darstellen. Konzept I lässt sich bei Bedarf ohne grundsätzliche Änderungen zu Konzept II umwandeln, in dem z.B. das Rammfahrzeug von einem Stapler als Supply-Fahrzeug unterstützt wird. Dieser Aspekt wird daher nachfolgend nicht weiter betrachtet.

Mit den Berechnungsskripten liegt zudem ein Tool vor, mit dem bei genauere Kenntnis von Anschaffungskosten einzelner Fahrzeuge usw. die Ergebnisse in Zukunft präzisiert werden können.

Zu beachten ist, dass die Flugdrohne sich bei der Konzentrator-Montage in Konzept IV als kostengünstigstes Supply-Fahrzeug herausstellt, jedoch nicht realistisch angewendet werden kann. Dies hat mehrere Ursachen. Zum einen ist die betrachtete Drohne *Flycart 30* des Herstellers *DJI* mit einer Nutzlast von max. 40 kg gerade so dazu in der Lage, den Konzentrator mit 35 kg zu tragen, wobei noch kein Greifmechanismus berücksichtigt ist. Zum anderen ist die Genauigkeit, mit der die Drohne gesteuert werden kann, mit ± 10 cm anzunehmenderweise zu ungenau, um den Konzentrator abzulegen, da diese Toleranz auch in der Flughöhe besteht. Auch ist die Drohne deutlich witterungsabhängiger als Bodenfahrzeuge, so z.B. gegenüber Wind. Zudem besteht

4. Konzeptionierung

allgemein die Möglichkeit von Abstürzen. Um die Drohne realistisch einsetzen zu können, kämen wahrscheinlich Anpassungskosten hinzu, welche den aktuellen (in der Berechnung) Kostenvorteil ausgleichen oder umkehren. Aus diesen Gründen wird die Drohne nicht weiter als Option betrachtet.

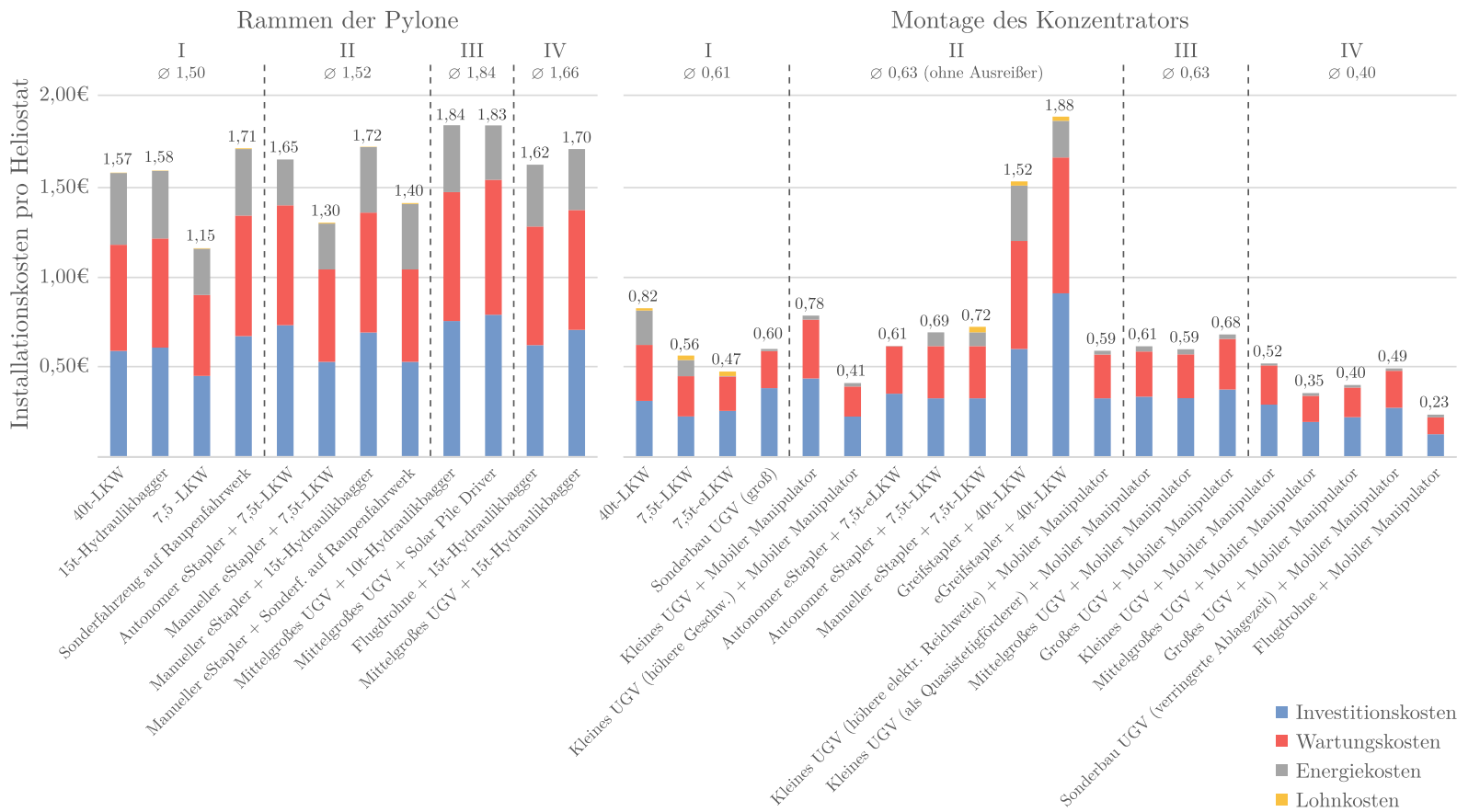


Abbildung 4.30.: Veranschaulichung der Installationskosten pro Heliostat bei Anwendung der verschiedenen Installationskonzepte mit verschiedenen Fahrzeugkonfigurationen.

4.5. Navigation, Sensorik und automatisches Fahren

Um die gewünschte Automatisierung oder Autonomie zu erreichen, aber auch bei manuell bedienten Maschinen spielt die Navigation eine entscheidende Rolle für den Aufbau des Solarfeldes. Jeder Heliostat muss schlussendlich an der richtigen Position installiert werden. Ohne genaue Navigation oder Vermessungstechnik sind die geforderten Genauigkeiten nicht zu erreichen. Dies gilt auch für manuell bediente Maschinen. Bei automatischem oder autonomem Betrieb müssen die Fahrzeuge darüber hinaus gesteuert und koordiniert werden. Da in dieser Arbeit der Fokus auf der „Hardware“ liegt, wird nur auf die Sensoren zur Bestimmung der Position und Erkennung von Objekten eingegangen. Letzteres ist beispielsweise für die Erkennung der Pylonen zur Montage des Konzentrators relevant. Auch wird grundsätzlich von fahrerlosen Transportmitteln ausgegangen.

Softwareseitige Fragen, wie z.B. zur Programmierung oder auch die Detailfragen der Steuerung, wie zentrale Leitsteuerung oder dezentrale Steuerung oder Energiemanagement werden nicht thematisiert. Die Anforderungen werden im Folgenden erläutert.

4.5.1. Anforderungen

Die Sensorik der Navigation muss im Außeneinsatz anwendbar sein, z.B. unter starker Sonneneinstrahlung. Darüber hinaus soll eine zügige Inbetriebnahme möglich sein. Daraus folgt z.B., dass es hinderlich wäre, erst Lasermarkierungen auf der Baustelle zu installieren. Dies ist wichtig, da die Zeit der Inbetriebnahme die Zeit, die nötig ist ein Solarfeld zu errichten, siehe Kapitel 4.4.5, verlängert.

Die Anforderungen hinsichtlich der Positionierungsgenauigkeit sind vom DLR vorgegeben. Die Abweichung der Heliostatposition darf maximal 10 mm von der Position im Lageplan des Solarfeldes betragen. Darüber hinaus soll die Winkelabweichung kleiner als 5° gegenüber der lotrechten Position sein.

Es bestehen zu diesem Zeitpunkt der Entwicklung keine speziellen Sicherheitsanforderung, wie sie bei Flurförderfahrzeugen in Produktionsanlagen bestehen. Es wird davon ausgegangen, dass die Baustelle des Solarfeldes während des Betriebs nicht von Mitarbeitern betreten wird. Auch andere Verkehrsmittel sind nicht auf der Baustelle unterwegs. Darüber hinaus wird angenommen, dass auf der geplanten Ebene keine Vegetation oder andere Hindernisse existieren.

Tabelle 4.12.: Anforderungen an die Navigation, Sensorik und automatisches Fahren (Vollständige Anforderungsliste unter Anhang A.2.)

Datum	F/W	Anforderungen	Verantw.
Navigation, Sensorik und automatisches Fahren			
März '24	F	Anwendbarkeit im Außeneinsatz	DLR
April '24	F	Toleranz für des Heliostaten/Pfahls muss eingehalten werden (vgl. Vibrationsrammen Tabelle A.2)	DLR
Juli '24	F	Einfache/Zügige Inbetriebnahme	DLR
Juli '24	F	Kein Personenverkehr auf der Baustelle. Keine Hindernisse, wie Vegetation.	DLR

4.5.2. Stand der Technik

Bei fahrerlosen Fahrzeugen wird zwischen automatischen und autonomen Funktionen unterschieden. Relevante automatische Funktionen von fahrerlosen Fahrzeugen sind [UA23]:

- Fahren auf physischer oder virtueller Spur
- Automatisches Energie-Management
- Automatisches Lasthandling
- Geführtes Kartieren der Einsatzumgebung (3D Kartenerstellung)
- Lageerfassung (Bestimmung der Position und Ausrichtung im Raum)
- Situationsbedingte Verkehrsregelung
- Selbstdiagnose (z.B. zur vorbeugenden Wartung)

Aktuelle bekannte relevante Funktionen der Autonomie sind [UA23]:

- Selbstständige, dynamische Änderung der Einsatzumgebung im laufenden Betrieb
- Fahren auf freigegebenen Flächen ohne physische oder virtuelle Spur
- Umfahren von Hindernissen (2D oder 3D Erfassung)

4. Konzeptionierung

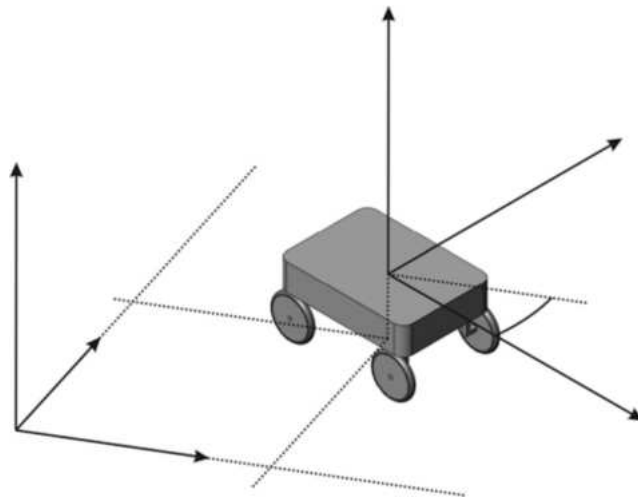


Abbildung 4.31.: Veranschaulichung des ortsfesten und Fahrzeug-Koordinatensystems [UA23].

Wie aus diesen Funktionen zu erkennen ist, handelt es sich größtenteils um softwarebedingte Funktionen. Wie zuvor erwähnt, liegt der Fokus auf der Hardware. Es werden daher im Folgenden Sensoren diskutiert, welche die Voraussetzung für die aufgezählten Funktionen bilden. Automatische oder autonome Funktionen werden vor diesem Kontext nicht unterschieden, da grundsätzlich die gleichen Sensoren verwendet werden und sich nur die Art der Verwendung der Sensordaten unterscheidet.

Für die Fahrfunktionen sowie die genaue (im Rahmen der Toleranz) Positionierung der Heliostaten muss die Position und Lage der Fahrzeuge auf der Baustelle möglichst genau bestimmt werden. Hierzu wird ein ortsfestes Koordinatensystem wie in Abbildung 4.31 dargestellt angelegt. Verschiedene Systeme zur Positionsbestimmung im Außeneinsatz stehen zur Verfügung [UA23] [Weh+20]:

Laser-Triangulation Bei der Laser-Triangulation werden Markierungen angebracht, welche durch einen Laserscanner auf dem Fahrzeug erkannt werden. Um die Position zu bestimmen, müssen in der Regel zwei bis drei Markierungen gleichzeitig erfasst werden. Es werden Genauigkeiten von unter ± 10 mm erreicht.

Rasternavigation Für die Rasternavigation wird ein Raster aus Bodenmarkierungen angelegt, an denen sich das Fahrzeug frei orientiert. Bei den Markierungen handelt es sich häufig um Dauermagnete, Transponder oder QR-Code-Label. Die Genauigkeit erhöht sich mit der Dichte des

4.5. Navigation, Sensorik und automatisches Fahren

Rasters. Der Abstand variiert zwischen 1 und 10 m. Zur Lagebestimmung wird das System in der Regel mit der Koppelnavigation (siehe unten) kombiniert. Auch andere Sensoren, wie z.B. Gyroskope, können verwendet werden.

GNSS,dGNSS, RTK-dGNSS Die Positionsbestimmung mittels globaler Navigationssatellitensysteme (engl. global navigation satellite system, abgekürzt GNSS), wie GPS oder Galileo, bietet im Außeneinsatz je nach technischem Aufwand unterschiedliche Genauigkeiten. Liegt die Genauigkeit bei der ausschließlichen Nutzung der Satelliten zur Positionsbestimmung noch bei ± 12 m, wird durch differentielles GNSS (dGNSS) bereits eine Genauigkeit von ± 1 m erreicht. Dabei werden Korrekturdaten von einer stationären Referenzstation, deren Position exakt vermessen wird, mit den Positionsdaten des Fahrzeugs zusammen ausgewertet. Noch höhere Positionierungsgenauigkeit erreicht man durch Echtzeitkinematik (engl. Real-time kinematic positioning, RTK), welches mit dGNSS kombiniert wird. Dabei wird neben der Positionsabweichung von Referenzstation und Fahrzeug zusätzlich die Phasenverschiebung zwischen den empfangenen Signalen ausgewertet. Es wird eine Genauigkeit von bis zu ± 1 cm erreicht. Notwendig ist eine freie Sicht in den Himmel innerhalb eines mindestens 15° großen Kegels.

LPR (Local Positioning Radar) Hier werden anstelle von Satelliten eigene Funkbaken aufgestellt. Es kann eine Genauigkeit von ± 10 cm erreicht werden.

Navigation mit Umgebungsdaten/3D Kartenerstellung Anstatt Lasermarkierungen anzubringen, wird bei der Inbetriebnahme die Umgebung von einem Laserscanner abgescannt und eine virtuelle Karte erstellt, in der natürliche Objekte als Landmarken erfasst und später zur Bestimmung der Position genutzt werden. Auch kann ein gleichzeitiges Erstellen der Karte und Bestimmen der Position angewendet werden (engl. Simultaneous Localisation and Mapping, abgekürzt SLAM), wodurch die Karte stetig aktualisiert wird. Neben Laserscannern zur 2D Kartenerstellung kommen LiDAR Sensoren zur Erstellung von 3D Karten zum Einsatz. Auch die Verwendung von mindestens zwei Kameras und softwareseitiger Aufbereitung der Daten ist möglich. Es wird eine Genauigkeit von unter ± 10 mm erreicht.

Odometrie/Koppelnavigation Bei der Odometrie werden Fahrzeugdaten, wie die Umdrehung der Räder und der Lenkeinschlag, ausgewertet, um die Fahrzeugposition zu bestimmen (Koppelnavigation). Das System ist sehr

4. Konzeptionierung

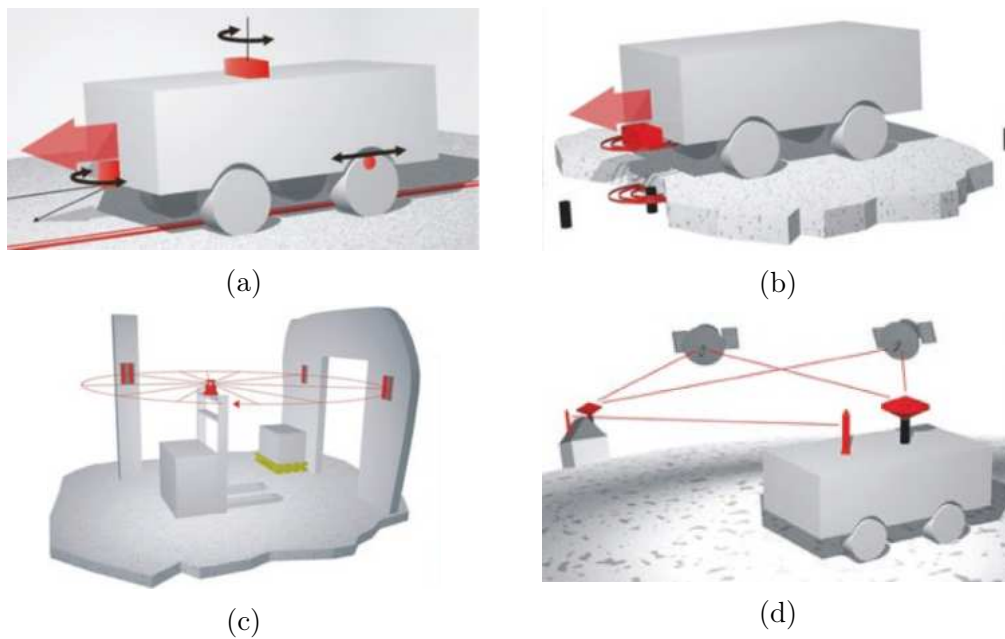


Abbildung 4.32.: Veranschaulichung der verschiedenen Arten der Navigation – (a) Koppelnavigation, (b) Rasternavigation, (c) Lasernavigation, (d) differentielles GNSS [UA23].

fehleranfällig, beispielsweise durch Schlupf, wird jedoch häufig ergänzend zu anderen Navigationsarten angewendet, um höhere Genauigkeiten zu erreichen.

4.5.3. Auswahl geeigneter Systeme

Bei der Auswahl geeigneter Systeme stellen die unterschiedlichen Fahrzeuge je nach Prozessschritt unterschiedliche Anforderungen. Die geforderte Genauigkeit der Positionierung der Heliostaten wird praktisch allein durch die Genauigkeit, mit der die Pylone gerammt wird, bestimmt. Prozessschritt 1 und der zugehörige Maschinenträger unterliegen demnach direkt den Genauigkeitsanforderungen in der Anforderungsliste, Tabelle 4.12. Parallel besteht der Wunsch der einfachen und vor allem zügigen Inbetriebnahme. Die *Rasternavigation* stellt demnach aufgrund des hohen Aufwands der Installation keine Option dar, zumal hohe Genauigkeiten nur mit hoher Dichte des Rasters an Markierungen erreicht wird. Außerdem müssen die Markierungen auch genau platziert werden. Dies trifft auch auf die *Laser-Triangulation* zu. Auch bei der *Laser-Triangulation* müssen Markierungen angebracht werden, jedoch je nach



Abbildung 4.33.: Sicherheitslaserscanner mit Aufprallschutz [UA23].

Reichweite des Laserscanners beträchtlich weniger als bei der Rasternavigation. Auch die *Navigation mit Umgebungsdaten* bzw. die *3D Kartenerstellung* kann bei Prozessschritt 1 nicht ohne weitere Vorbereitung angewendet werden, da als Bauland eine planierte Ebene ohne Vegetation angenommen wird. Es müssten demnach auch hier künstliche Markierungen platziert werden.

Die Positionsbestimmung mit *LPR* erreicht nicht die notwendige Genauigkeit. Ebenso ungenau ist die *Odometrie*, wenn sie alleine genutzt wird, insbesondere bei den unbekanntem Bodenverhältnissen.

Realistisch erscheint vor den Genauigkeitsanforderungen von max. ± 10 mm Abweichung in der Ebene und der Inbetriebnahme ohne größere Vorbereitungen nur die *RTK-dGNSS* Positionsbestimmung. Sie ermöglicht nach der genauen Positionierung der Referenzstation einen quasi direkten Betrieb. Die Genauigkeit liegt genau auf der Toleranzgrenze und entspricht daher den Anforderungen. Über die Bestimmung der Position und Lage des Rammfahrzeugs kann durch die bekannten Abmessungen auch die Position der Ramme bzw. der Pylone genau bestimmt werden, siehe Abbildung 4.31. Durch ein Gyroskop kann die lotrechte Aufstellung gewährleistet werden. Weitere Sensoren können notwendig sein, so etwa beim Neubeladen des Fahrzeugs im Hauptlager oder zum Personenschutz. Laserscanner und sogenannte Sicherheitslaserscanner (siehe Abbildung 4.33) entsprechen hier dem Stand der Technik. Darüber hinaus können zusätzlich Laserscanner verwendet werden, um die Genauigkeit weiter zu erhöhen. Insbesondere in den vordersten Reihen in unmittelbarer Nähe zum Lager, wo der Abstand zwischen den Heliostaten am geringsten ist, bietet sich diese Option an, da hier Positionsabweichungen besonders problematisch sind und eine Installation von Lasermarkierungen am Lager selbst wenig Aufwand erfordert.

Für Prozessschritt 2 können die zuvor gerammten Pylonen als Landmarken für die *Navigation durch Umgebungsdaten* verwendet werden. Durch präzise LiDAR Sensoren und 3D Kartenerstellung in Echtzeit (SLAM) sowie dGNSS, um die ungefähre Position zu bestimmen, können also nachfolgende Fahrzeuge mit geringerem Aufwand navigieren. Gleichzeitig ist die Objekterkennung der Pylonen durch LiDAR ohnehin notwendig für die Platzierung der Konzentratoren

4. Konzeptionierung

auf den Pylonen und für die Befestigung mit Dünnblechschrauben.

Zusammengefasst ergibt sich, dass das Rammfahrzeug sinnvoller Weise mit teureren RTK-dGNSS Sensoren und mindestens einem Sicherheitslaserscanner und das Supply-Fahrzeug sowie das Montagefahrzeug mit preiswerteren LiDAR und GNSS/dGNSS ausgestattet sein sollte.

4.6. Zwischenfazit

Das Ergebnis der Konzeptionierung ist die Auswahl der Maschinen für die Prozessschritte zur Installation der Heliostaten, ein Konzept zum effizienten Materialfluss und die Auswahl zugehöriger Fahrzeuge sowie Sensoren.

Zusammengefasst ergibt sich, aufgeschlüsselt nach den Prozessschritten:

1. Rammen der Pylone

Prozess Rammen mit leichter Vibrationsramme mit Innenrohr (Knickschutz) am Spannfutter

Materialflusskonzept Konzept I – Fahrzeug wird im Hauptlager beladen, kein Supply-Fahrzeug

Maschinenträger Hydraulikbagger (8-18 t), kleiner LKW (7,5-12 t) oder Sonderfahrzeug auf Raupenfahrwerk ähnlicher Größe – Ladekapazität: min. 200 Pylone

Sensorik RTK-dGNSS zur Positionsbestimmung, optionaler Laserscanner zum Personenschutz und Erhöhung der Genauigkeit

2. Konzentrador-Montage

Prozess Fügen mit Schraubautomat an Leichtbauroboter zum Einschrauben von Dünnblechschrauben

Materialflusskonzept Konzept IV – Montage Fahrzeug unterstützt durch ein Supply-Fahrzeug, welches Bauteile im Feld an der Position der Verwendung ablegt

Maschinenträger Kleines UGV

Supply-Fahrzeug Mittleres UGV – Ladekapazität 6 bis 8 Heliostaten

Sensorik dGNSS zur ungefähren Positionsbestimmung mit LiDAR zur 3D Kartenerstellung und Navigation anhand von Landmarken (gerammte Pylonen) sowie Erkennung der Pylonen zum Ablegen/Fügen

Aufbauend auf dieser Konfiguration wird nachfolgend eine Detaillierung vorgenommen.

5. Detaillierung

In dem Kapitel 4 *Konzeptionierung* wurde ein grundsätzliches Konzept ausgearbeitet, mit welchen Maschinen, auf welchen potentiellen Fahrzeugen und nach welchem Materialflusskonzept das Solarfeld errichtet wird. Dabei sind explizite Ausgestaltungen bisher nicht gezeigt worden. In diesem Kapitel werden die noch offenen Punkte

- wie die Pylonen der Vibrationsramme zugeführt werden,
- wie die Pylonen gelagert werden und analog
- wie die Konzentratoren im Feld abgelegt werden,

thematisiert. Es werden grundsätzliche konstruktive Elemente der notwendigen Peripherie geklärt und daraus ein Designvorschlag abgeleitet.

5.1. Prozessschritt 1 – Rammen der Pylone

Für das Rammen der Pylone hat sich Materialflusskonzept I hinsichtlich der Kosten als sinnvoll ergeben. Die Ladekapazität der Pylonen auf der Maschine muss hierfür mindestens 200 Pylonen betragen. In dem berechneten Szenario in Konzept I wurden ein Hydraulikbagger, ein Klein-LKW mit 7,5 t, ein LKW mit 40 t und ein Sonderfahrzeug auf Basis eines Raupenfahrwerks berücksichtigt. Der LKW mit 40 t und einer Ladekapazität von 500 Pylonen wird nicht weiter betrachtet, da dieses Fahrzeug innerhalb des Konzepts I nicht die günstigste Option darstellt und gleichzeitig anzunehmen ist, dass die Manövrierbarkeit und Steuerungsgenauigkeit aufgrund der Fahrzeuggröße den anderen Fahrzeugen unterlegen ist.

Vor dem Hintergrund der Anforderungen, siehe 4.9, müssen die Fahrzeuge für den Stop-and-Go Betrieb geeignet sein. Durch die Hydraulikmotoren des Baggers und des Raupenfahrwerks ist diese Betriebsart bei diesen Fahrzeugen gut möglich. Der 7,5 t LKW mit Dieselantrieb scheidet vor diesem Hintergrund aus, da anzunehmen ist, dass vor allem die Kupplung und der Motor unter dem stetigen Anfahren hohen Verschleiß erleiden. Alternativ könnten die elektrischen Varianten solcher Fahrzeuge gewählt werden, so etwa der *Mercedes eSprinter* mit Pritschenaufbau oder der *Mitsubishi eFuso*. Weiter ist ein

5. Detaillierung

steifes Fahrwerk zum Betrieb der Vibrationsramme gefordert. Die Raupenfahrwerke sind hier allgemein im Vorteil. Auch sinkt durch die Verwendung von Raupenfahrwerken der Bodendruck, da die Last der Maschine auf eine größere Fläche verteilt wird. Ein LKW könnte dagegen durch Fahrwerksanpassungen ausreichend modifiziert werden.

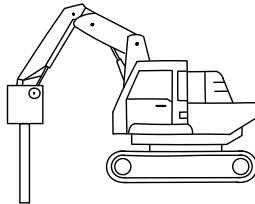
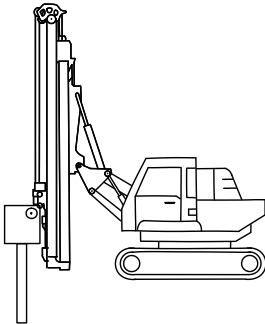
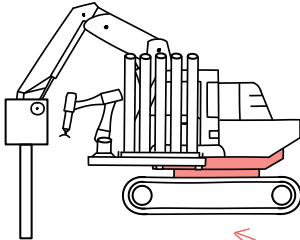
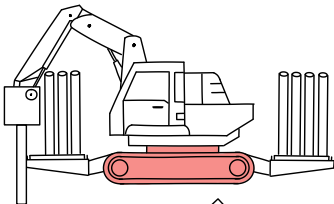
Alle Fahrzeuge müssten für automatisches Fahren ausgestattet werden. Das Sonderfahrzeug weist hier die einfachste Automatisierbarkeit auf, da auf alle Komponenten von Beginn an Einfluss genommen werden kann und so eine optimierte Lösung erreicht wird. Serienfahrzeuge, so auch der Bagger, müssen nachträglich umgerüstet werden, was potentiell aufwendiger ist. Dagegen sind die Anschaffungskosten von Serienfahrzeugen gut kalkulierbar, während die Entwicklungskosten eines Sonderfahrzeugs nur abgeschätzt werden können. In welchem Maße sich welche Variante lohnt, ist auch vor dem Kontext der tatsächlichen Nachfrage an zu errichtenden Solarfeldern zu bewerten. Da das Zusammenspiel dieser Größen im Rahmen dieser Arbeit schlecht zu bewerten ist, wird kein explizites Fahrzeug ausgewählt.

Der LKW und das Raupenfahrwerk können grundsätzlich als Plattform angenommen werden. Der Aufbau ist demnach analog und wird gemeinsam betrachtet. Es findet im Folgenden keine weitere Differenzierung statt. Der Hydraulikbagger bietet dagegen eine grundsätzlich andere Basis und wird daher getrennt betrachtet. Es wird für diese beiden Fahrzeugkonzepte ein Aufbau gestaltet.

5.2. Hydraulikbagger

Der Hydraulikbagger kann quasi als Ready-to-Run Lösung betrachtet werden. Die Schnittstellen sind genormt, so dass die Vibrationsramme direkt freireitend am Baggerarm oder an einem Teleskopmäkler ohne konstruktive Anpassungen montiert werden kann. Auch die Energieversorgung ist durch das Hydraulikaggregat des Baggers, welches auch für den Fahrtrieb genutzt wird, gegeben. Der Bagger muss auf automatischen Betrieb umgerüstet werden. Die Firma *Götting KG* beispielsweise bietet solche Lösungen an. Es muss daher lediglich eine Möglichkeit gefunden werden, ein Speicher/Lager für die Pylone am Bagger zu montieren. Gestaltungsvorschläge für verschiedene Kombinationen befinden sich in Tabelle 5.1

Tabelle 5.1.: Gestaltungsvorschläge für die Führung der Ramme sowie Speicherung und Nachführung der Pylonen an einem Hydraulikbagger.

Hauptgr.	Lösungen	
	1	2
A		
	Freireitend am Baggerarm	Teleskopmäkler
B		
	Anbau am Oberwagen (mit Handhabung)	Anbau am Unterwagen (direkt Entnahme mit Baggerarm)

A Führung der Ramme **B** Anbauposition des Speichers

Diese Lösungen wären zwar schnell verfügbar, entsprechen langfristig jedoch wahrscheinlich nicht dem Optimum. In der Szenarioberechnung hat sich herausgestellt, dass das Rammen der Pylonen eines Solarfeldes ca. 72 Stunden dauert, während für die Konzentrator-Montage beim betrachteten Konzept IV nur ca. 32 Stunden benötigt werden. Um die Installationskosten effektiv zu senken, liegt der größte Hebel demnach beim Senken der Taktzeit von Prozessschritt 1, dem Rammen der Pylone. Die Möglichkeit bei einer Spezialmaschine

5. Detaillierung

auf Basis eines Raupenfahrwerks oder LKWs die Taktzeit zu senken, ist deutlich eher gegeben als bei einem Hydraulikbagger, da alle Komponenten mit den eigenen Anforderungen abgestimmt werden können. Eine mögliche Gestaltung eines solchen Fahrzeugs liegt im folgenden Abschnitt vor.

5.3. LKW und Kettenfahrzeug

Diese Fahrzeuge bieten eine große, plattformartige Ladefläche. Auf dieser müssen verschiedene Funktionen erfüllt werden. Die Ramme muss mit hydraulischer Energie versorgt werden. Ein LKW bietet zwar je nach Konfiguration häufig ein Hydraulikaggregat als Nebenantrieb, es bleibt jedoch offen, ob dies auch bei elektrischen Fahrzeugen zur Verfügung steht. Auch ist fraglich, ob die Leistung zum Betrieb der Ramme ausreicht. Das Raupenfahrwerk mit Hydraulikmotor muss ebenso wie die Ramme mit hydraulischer Energie versorgt werden. Es wird daher in beiden Fällen ein Hydraulikaggregat benötigt, jedoch mit unterschiedlicher Leistung. Zu klären wäre demnach, welche Energiequelle zur Versorgung des Hydraulikaggregats genutzt werden soll. Es stehen batterieelektrische und diesel-betriebene Varianten am Markt zu Verfügung. Da es sich bei der Art der Energiequelle um eine Detailfrage handelt, welche keinen Einfluss auf den grundsätzlichen Aufbau nimmt, wird diese Frage in dieser Arbeit nicht abschließend geklärt.

- A** Primär muss die Ramme geführt werden. Die Führung muss eine lotrechte Ausrichtung der Ramme bei leichten Bodenunebenheiten ermöglichen. Die Ramme muss mindestens in vertikaler Richtung verfahrbar sein, um den Rammvorschub zu gewährleisten. Diese Aufgabe wird von einem Teleskopmäkler erfüllt. Allerdings kann die Ramme auch freireitend an einem Baggerarm befestigt werden, der die selbe Funktion erfüllt (vgl. Tabelle 5.1).
- B** Weiter müssen Pylonen in großer Menge auf dem Fahrzeug gelagert werden. Hier bieten sich nur die Lösungen an, die Pylonen direkt auf der Ladefläche zu lagern oder mittels eines Ladungsträgers auf die Ladefläche zu übertragen.
- C** Die Art der Lagerung muss in Kombination mit der Handhabeinrichtung eine schnelle und sichere Bestückung der Vibrationsramme ermöglichen. Die Art der Lagerung und die der Handhabungseinrichtung beeinflussen sich gegenseitig. Auch hier wird eine kostengünstige Lösung bevorzugt.
- D** Die Pylone muss zur Handhabung gegriffen werden. Entsprechend wird ein Greifer benötigt. Dieser sollte das Rohr möglichst nicht beschädigen, aber

gleichzeitig einen festen Sitz bieten, damit die Pylone mit einer geringen Lagetoleranz an die Ramme übergeben werden kann. Im übrigen muss der Greifer gegebenenfalls in der Lage sein, eine einzelne Pylone aus einem eng gepackten Bündel zu greifen.

E Die Spannvorrichtung der Ramme ist zudem mit dem Innenrohr als Knickschutz ausgestattet.

F Zum Bestücken der Ramme mit einer Pylone muss diese auf das Innenrohr geschoben werden. Diese „Auffädeln“ bedarf einer Fügehilfe zum Ausgleich von Lagetoleranzen.

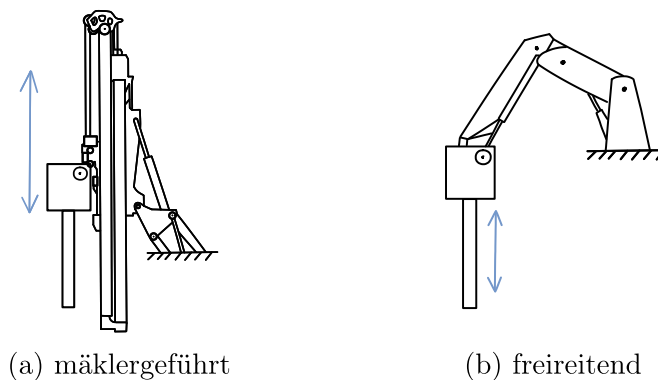


Abbildung 5.1.: Führung der Ramme.

Wird statt eines Baggers ein Sonderfahrzeug verwendet, bietet sich der Teleskopmäkler gegenüber einem Baggerarm an (siehe Abbildung 5.1), da dieser auf die notwendigen Funktionen reduziert ist und daher potentiell kostengünstiger ist und weniger Freiheitsgrade automatisiert werden müssen. Da beide Lösungen am Markt verfügbar sind, bietet der Baggerarm in diesem Fall keine Vorteile gegenüber dem Teleskopmäkler. Der Vollständigkeit halber wird darauf hingewiesen, dass auch die in Abbildung 5.1 nicht dargestellte Möglichkeit besteht, einen Teleskopmäkler an einem Baggerarm zu befestigen. Diese Lösung bietet hier ebenfalls keine Vorteile.

5. Detaillierung

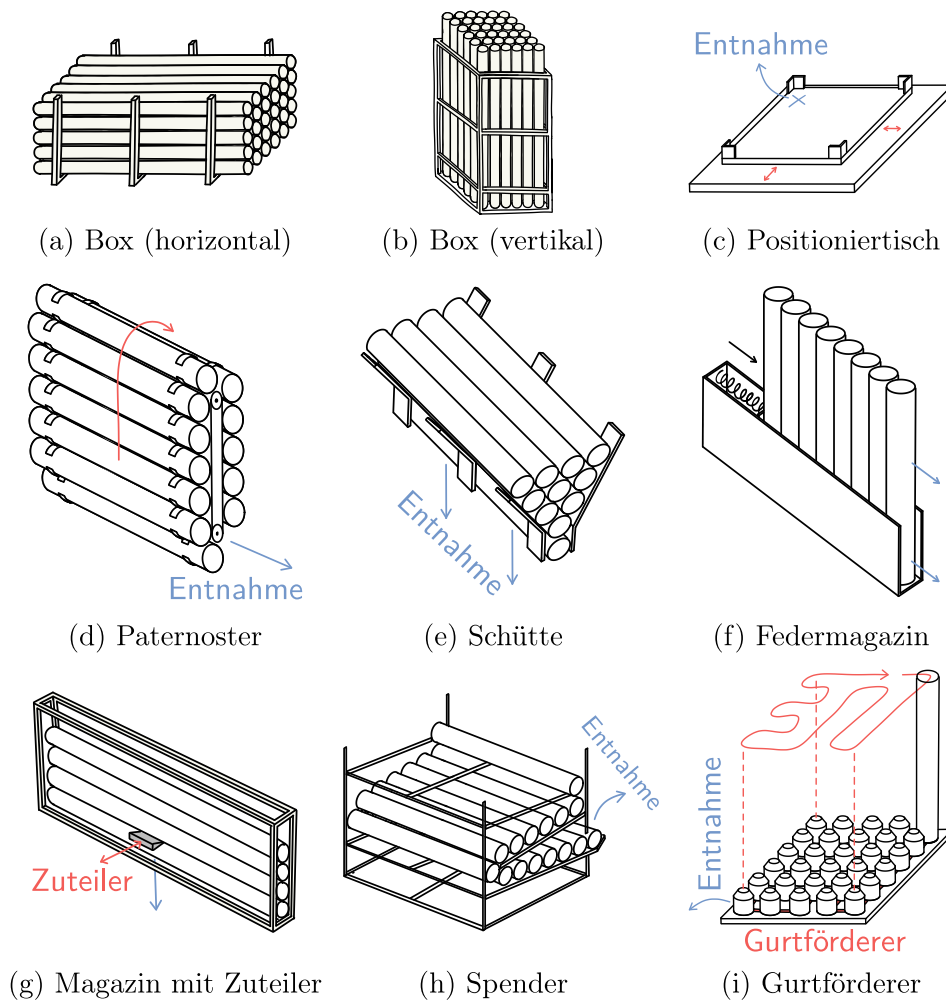


Abbildung 5.2.: Lagerung (Speichern) der Pylonen.

In Abbildung 5.2 sind unterschiedliche Lösungen für die Lagerung von Pylonen in einem Ladungsträger dargestellt. Die dichteste Packung der Pylonen wird mit einem Ladungsträger in Form einer einfachen Box erreicht. Ladungsträger, die eine Positionierung einer Pylone an der immer gleichen Stelle ermöglichen, bieten den Vorteil, dass eine Handhabungseinrichtung einfacher ausgeführt werden kann. Bei Lösung (f) wird praktisch keine Handhabungseinrichtung benötigt, dafür bietet sie jedoch auch nur eine geringe Ausnutzung der Ladefläche. Die eingesparte Handhabungseinrichtung wird jedoch durch die teureren Ladungsträger kompensiert. Da prinzipiell viele Pylonen verbaut werden müssen, bietet eine Handhabungseinrichtung in Kombination mit einem günstigen Ladungsträger langfristig einen Kostenvorteil.

Die Box mit horizontal gelagerten Pylonen hat gegenüber der Box mit ver-

tikal gelagerten Pylonen den Nachteil, dass die Pylonen nach der Entnahme gedreht werden müssen, bzw. dass die Ramme geschwenkt werden muss, damit die Pylonen ihr zugeführt werden können. Es wird daher eine vertikale Lagerung in einer Box favorisiert.

Darüber hinaus ermöglicht ein günstiger Ladungsträger auch die direkte Nutzung als Ladungsträger für den überbetrieblichen Materialfluss in ISO-Containern. Ein Umlagern der Pylone entfällt in diesem Fall, wodurch weitere Kosten gespart werden können.

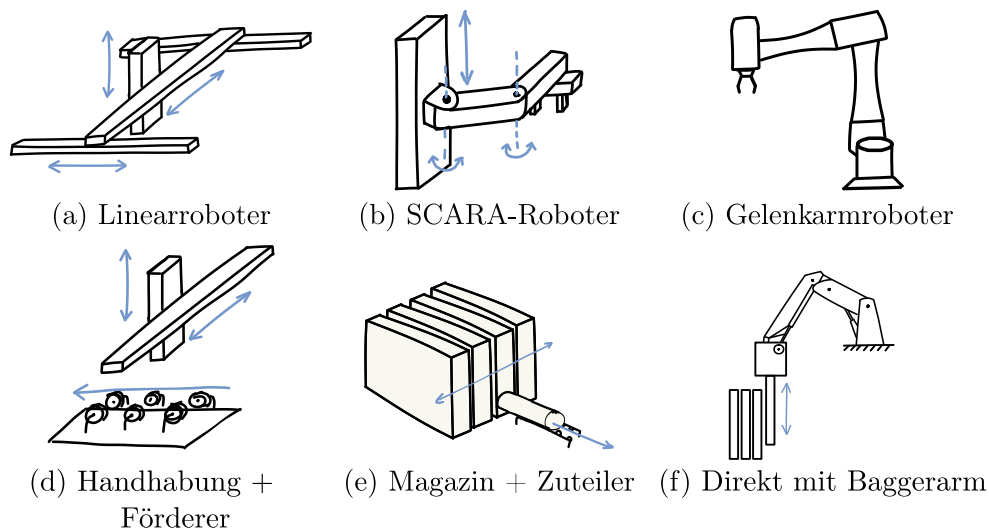


Abbildung 5.3.: Handhabung/Zuführung der Pylone in die Ramme.

Die Lösungen für eine Handhabung der Pylonen in Abbildung 5.3 erfüllen alle die Anforderung, die verhältnismäßig leichten Rohre handzuhaben. Lösung (f) ist nur in Kombination mit einem Baggerarm möglich und scheidet deshalb aus. Lösung (d) und (e) stellen höhere Anforderungen an die Ladungsträger und sind daher vermutlich langfristig teurer. Ein Linearroboter (a), ein SCARA-Roboter (b) und ein Gelenkarmroboter (c) bieten einen ähnlich hohen Grad an Flexibilität (der Gelenkarmroboter sowie SCARA mehr als der Linearroboter), jedoch ist die Form des Aktionsraums unterschiedlich. Während der Gelenkarmroboter und der SCARA-Roboter von oben betrachtet einen kreisförmigen bzw. nierenförmigen Aktionsraum haben, bietet der Linearroboter einen rechteckigen Aktionsraum und damit auch die größte räumliche Ausnutzung des wahrscheinlich ebenfalls rechteckigen Ladungsträgers. Dazu sind die Kosten des Linearroboters potentiell niedriger.

5. Detaillierung

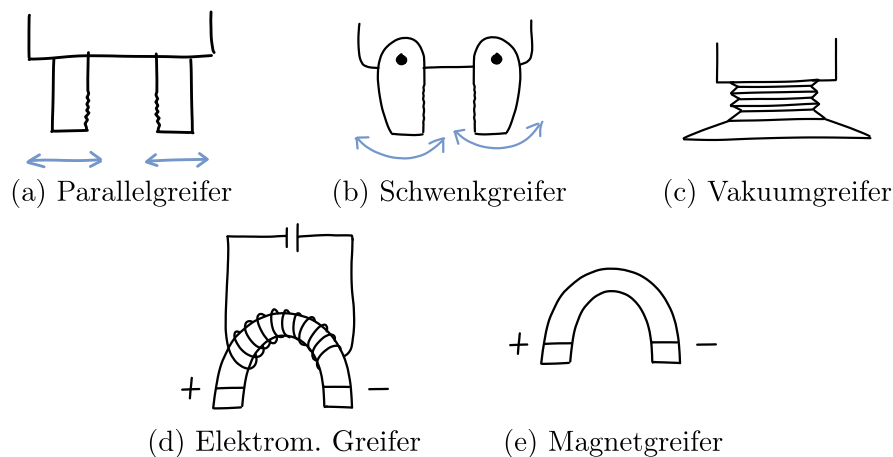


Abbildung 5.4.: Greifer zum Greifen der Pylone.

Abbildung 5.4 zeigt mögliche Bauformen eines Greifers. Da die Pylonen aus ferromagnetischem Baustahl gefertigt sind, bietet sich ein magnetischer Greifer an. Elektromagnetische Greifer haben sich hierbei bewährt. Insbesondere in Kombination mit einer vorgeformten und eventuell gummierten Aufnahme für die Pylone ist ein sicheres und schonendes Greifen von der Seite ohne Umschlingen möglich. Dies ermöglicht die Entnahme einer Pylone aus einem dicht gepacktem Bündel. Der Energieverbrauch eines elektromagnetischen Greifers ist zwar höher als der eines klassischen formschlüssigen Greifers, jedoch hält sich auch bei dem elektromagnetischen Greifer der Energieverbrauch durch eine relativ kurze Haltedauer in Grenzen – insbesondere in Relation zum Energieverbrauch der Ramme.

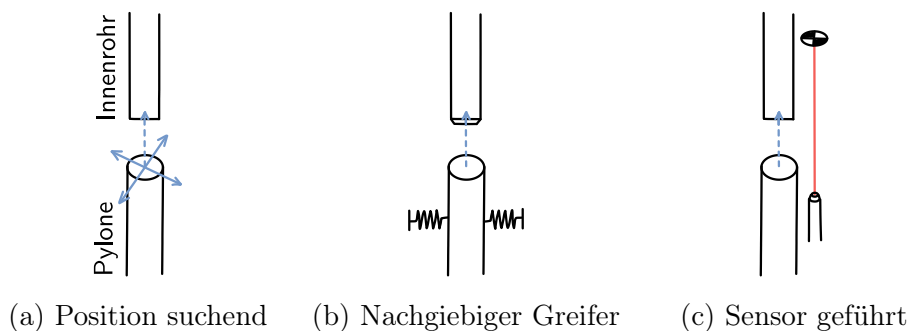


Abbildung 5.5.: Fügehilfen zum „Einfädeln“ des Innenrohrs in die Pylone.

Grundsätzlich stehen die in Abbildung 5.5 dargestellten Fügehilfen zur Verfügung, um eine Lagetoleranz von Pylone und Innenrohr (Knickschutz am Spannfutter der Ramme) auszugleichen. Die Ausgangslage der Ramme ist bekannt und der Linerarroboter ausreichend genau steuerbar, sodass anzunehmen

ist, dass die Lagetoleranz insgesamt gering ist. Ein leicht nachgiebiger Greifer in Kombination mit einer ausreichend großen Fase am Innenrohr erscheint vor diesem Hintergrund als robusteste und kostengünstigste Lösung.

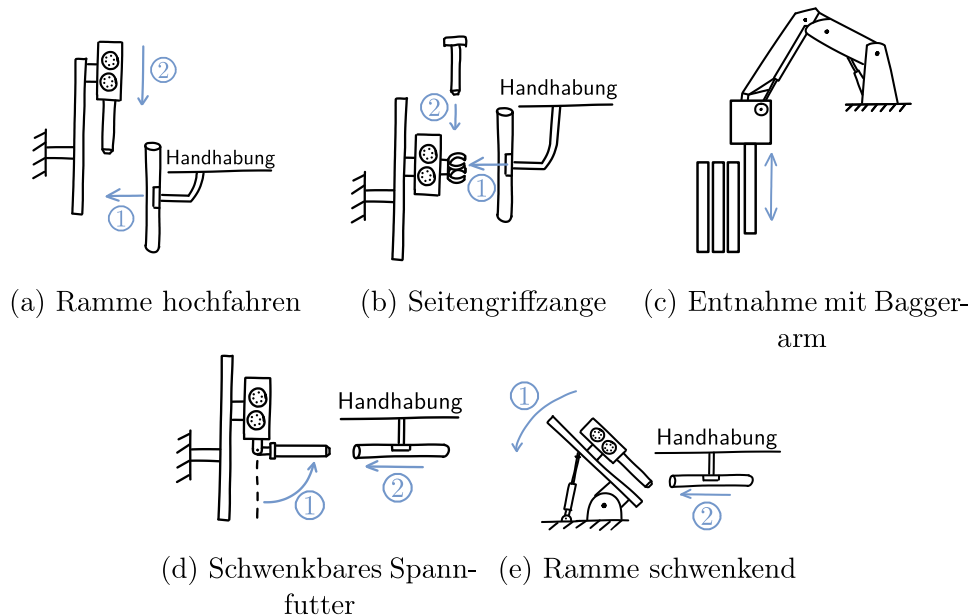


Abbildung 5.6.: Möglichkeiten der Bestückung der Ramme.

Abbildung 5.6 zeigt verschiedene Möglichkeiten zur Nachführung einer Pylone zur Bestückung der Ramme. Ausgehend von den zuvor ausgewählten Lösungen kommen nur die Lösungen (a) und (b) in Frage, da hier die Pylonen vertikal gelagert sind. Bei Lösung (a) muss die Ramme mit dem Innenrohr mindestens um die doppelte Länge des Innenrohrs nach oben verfahren werden, damit eine Pylone darunter platziert werden kann. Bei Verwendung einer Seitengriffzange (b) kann die Pylone ohne ein Hochfahren der Ramme nachgeführt werden. Allerdings stellt das nachträgliche Einführen des Innenrohrs eine konstruktive Herausforderung dar, welche zu Mehrkosten führt. Da anzunehmen ist, dass eine bloße Verlängerung des Teleskopmäklers kostengünstiger als eine zusätzliche Einrichtung ist, wird Lösung (a) verwendet.

Abbildung 5.7 zeigt den exemplarischen Aufbau eines Rammfahrzeugs mit den zuvor beschriebenen Elementen auf Basis eines Raupenfahrwerks.

5. Detaillierung

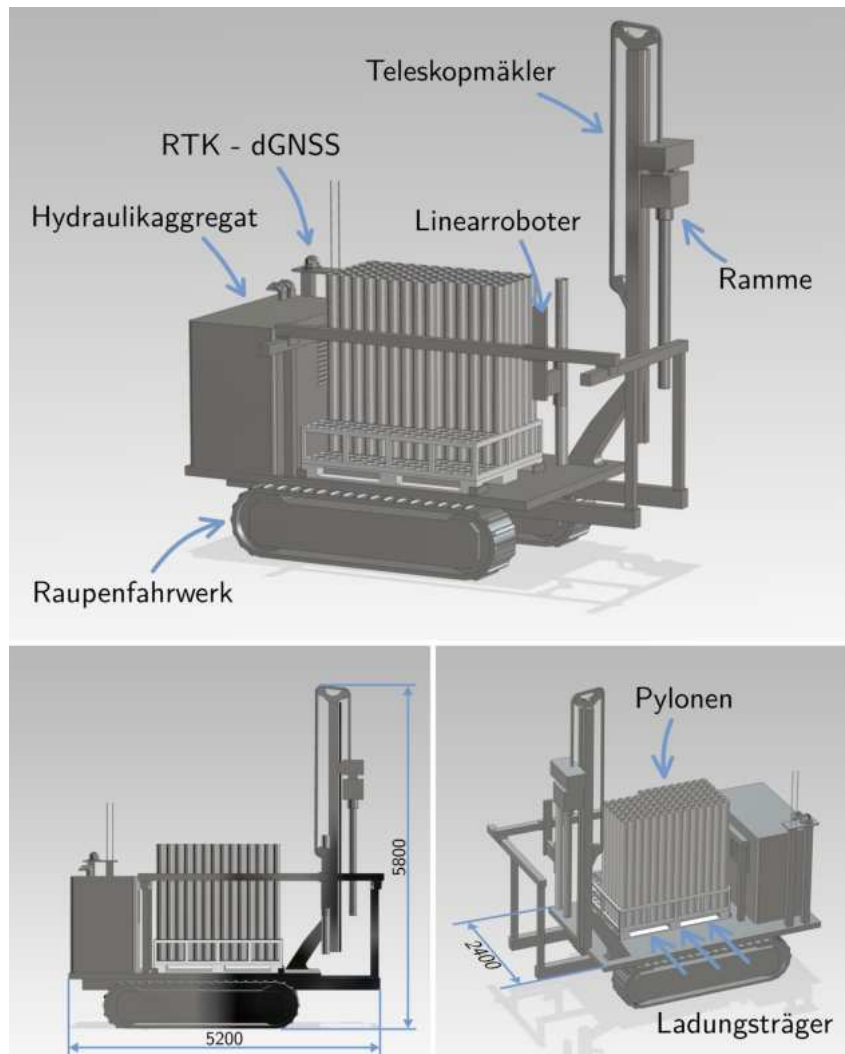


Abbildung 5.7.: Fahrzeugkonzept zum Rammen der Pylone.

5.4. Konzentrator-Montage

Der Heliostat muss in Prozessschritt 2 nun auf der gerammten Pylone montiert werden. In Abschnitt 4.3 wurde das Dünnschraubverfahren als Fügeverfahren ausgewählt. Durch die Szenarioberechnung wurde ermittelt, dass der Installationsprozess nach Konzept IV ablaufen sollte. Die Konzentratoren werden mit einem mittelgroßen autonomen Fahrzeug ins Feld transportiert und an der richtigen Stelle abgelegt. Ein zweites Fahrzeug mit Schraubautomat fügt anschließend beide Komponenten. Analog zum Rammprozess wird in diesem Kapitel auf die notwendige Peripherie eingegangen. Zuerst wird das Supply-

Fahrzeug (Ablagefahrzeug) thematisiert, da die Art, wie die Konzentratoren im Feld abgelegt werden, auch das Fügefahrzeug beeinflusst.

5.4.1. Konzentrator-Ablagefahrzeug

Die Aufnahme, der Transport und die Ablage des Heliostaten verhält sich anders als das Rammen der Pylonen. In der Rechnung wurde ermittelt, dass ein mittelgroßes UGV mit einer Ladekapazität von 6 Heliostaten das Optimum darstellt. Die Konzentratoren müssen sicher und geordnet aufgenommen werden. Aufgrund ihrer Sperrigkeit müssen diese sinnvoll angeordnet werden, um die Größe des Ablagefahrzeugs zu minimieren. Gleichzeitig muss ein zügiges Entladen in sinnvoller Reihenfolge möglich sein, um die Taktzeit zu reduzieren. Zur Platzierung wird eine Handhabungseinrichtung benötigt. Diese muss mit einem geeigneten Greifer ausgestattet sein. Des Weiteren ist die Platzierung des Konzentrators über der Pylone erforderlich. Hier sind Sensoren sowie unter Umständen Fügehilfen notwendig. Analog zum Rammfahrzeug sind für folgende Funktionen Lösungen zu finden und abzuwägen:

Art der Lagerung Direkt auf dem Fahrzeug oder mit einem Ladungsträger

Spiegelstellung Ist die Spiegelfläche zur Stützstruktur angewinkelt oder befindet sich der Konzentrator in Sicherheitsstellung?

Handhabeeinrichtung Basierend auf den bereits gezeigten Handhabungseinrichtungen erweisen sich in diesem Fall nur der Linearroboter, der SCARA-Roboter und der Gelenkarmroboter als sinnvoll. Eine Magazinierung bzw. ein Förderer eignen sich auf Grund der sperrigen Konzentratoren nicht.

Greifer Zur Aufnahme des Konzentrators mit der Handhabeeinrichtung wird ein Greifer benötigt. Basierend auf den Lösungen des Rammfahrzeugs werden zur Vermeidung weiterer Freiheitsgrade und der damit einhergehenden Kostenreduktion nur der Vakuumgreifer und ein magnetischer Greifer weiterverfolgt.

Ablageort Prinzipiell kann der Konzentrator neben der Pylone auf dem Erdboden abgelegt werden. Dies reduziert die Taktzeit, bedarf aber Schutzvorrichtungen des Konzentrators. Alternativ kann der Konzentrator direkt auf der Pylone an der finalen Position abgelegt werden, dies führt jedoch wegen der Positionierung zu einer höheren Taktzeit.

Fügehilfen Um Lagetoleranzen bei der finalen Positionierung des Konzentrators auf der Pylone auszugleichen, werden eine präzise Sensorik bzw.

5. Detaillierung

konstruktive Fügehilfen benötigt. Grundsätzlich ist dieser Vorgang ähnlich dem „Einfädeln“ des Innenrohrs in die Pylone beim Rammprozess. Es wird daher das selbe Verfahren verwendet. In diesem Fall wird jedoch die Pylone als ortsfest angenommen und der Konzentrator ist mit der Greifvorrichtung nachgiebig gelagert. Zudem wird der Rohrstumpf am Konzentrator mit einer ausreichend großen Fase versehen.

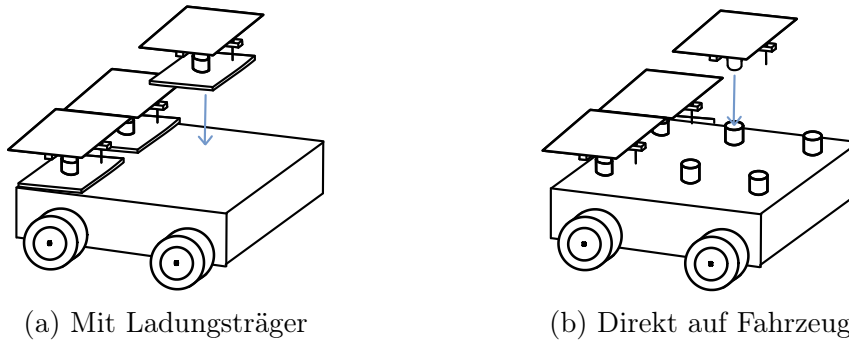


Abbildung 5.8.: Art der Lagerung des Konzentrators auf dem Supply-Fahrzeug.

Abbildung 5.8 zeigt zwei Möglichkeiten zur Lagerung der Konzentratoren auf einem Supply-Fahrzeug. Die Verwendung eines Ladungsträgers wäre von Vorteil, wenn dadurch die Beladungszeit am Lager verkürzt werden könnte, z.B. durch eine Zusammenfassung mehrerer Ladungsträger zu einer Einheit. Der entleerte Ladungsträger muss dann aber wieder zum Lager zurücktransportiert werden und in einem zusätzlichen Schritt entladen werden. Werden die Konzentratoren dagegen einzeln in fahrzeugfeste Halterungen geladen, kann davon ausgegangen werden, dass insgesamt ein ökonomischerer Prozess möglich ist. Es wird daher die direkte Lagerung favorisiert.

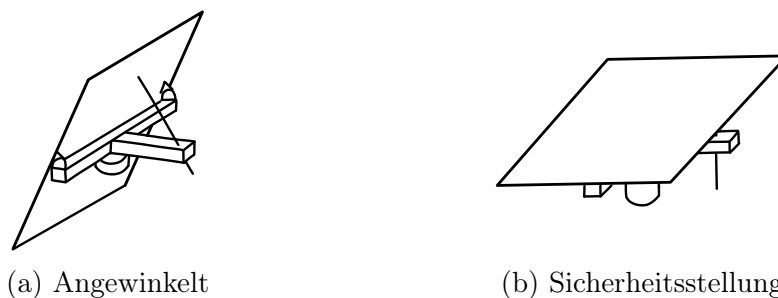


Abbildung 5.9.: Spiegelstellung des Konzentrators beim Transport.

Bei angewinkelter Spiegelfläche zur restlichen Stützstruktur des Konzentrators können die Konzentratoren deutlich platzsparender transportiert werden. Allerdings ist es für die nachfolgende Montage notwendig, dass die Zugänglichkeit rundum gegeben ist. Wird der Konzentrator, wie in Abbildung 5.9 (a) gezeigt, angewinkelt transportiert, müsste dieser folglich kurz nach der Ablage angesteuert werden und in Sicherheitsstellung gefahren werden. Auch besteht ein generelles Interesse, dass die Heliostaten sich nach der Installation in Sicherheitsstellung befinden, falls noch vor der Inbetriebnahme starker Wind aufkommen sollte. Einfacher in der Umsetzung ist daher der Transport direkt in der Sicherheitsstellung (b). Diese Option wird hier bevorzugt, auch wenn der Platzbedarf steigt, da zu diesem Zeitpunkt nicht angenommen werden kann, dass das direkte Verstellen nach Ablage möglich ist.

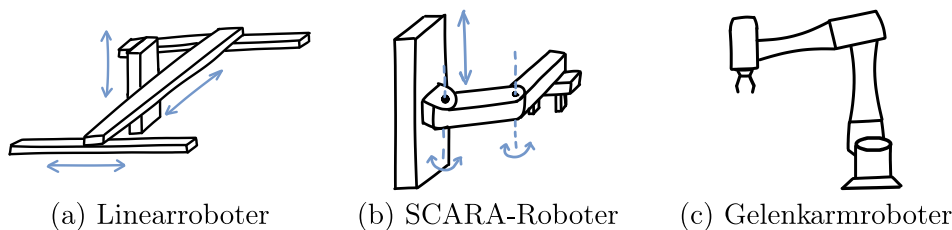


Abbildung 5.10.: Handhabeeinrichtung zum Ablegen des Konzentrators.

Abbildung 5.10 zeigt die möglichen Handhabeeinrichtungen in Form eines Linearroboters, eines SCARA-Roboters und eines Gelenkarmroboters. Der einfache und damit kostengünstigere Aufbau des Linearroboters bietet sich gegenüber dem SCARA-Roboter und dem Gelenkarmroboter an. Zudem kann der Linearroboter aufgrund seiner lastgerechten Bauweise die Last des Konzentrators von 35 kg bei einem geringeren Eigengewicht tragen. Sowohl SCARA als auch Gelenkarmroboter würden durch die Hebelarme bei gleicher Nutzlast beträchtlich größer und entsprechend teurer ausfallen. Zudem werden die höhere Flexibilität, bzw. das Mehr an Freiheitsgraden dieser Roboter nicht benötigt. Es wird daher der Linearroboter favorisiert.

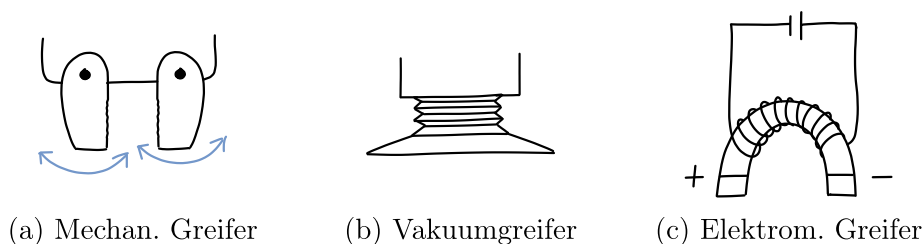


Abbildung 5.11.: Mögliche Arten von Greifern zur Aufnahme des Konzentrators.

5. Detaillierung

Abbildung 5.11 zeigt drei Möglichkeiten zum Greifen des Konzentrators. Dabei bietet sich ein Vakuumgreifer aus mehreren Gesichtspunkten an: Neben der oben erwähnten vereinfachten Zugänglichkeit direkt von oben ermöglicht die glatte Spiegelfläche einen energiesparenden Einsatz des Vakuums. Ein Vakuumgreifer kann zudem, je nach Ausgestaltung, eine gewisse seitliche Verschiebung tolerieren, welches die Anwendung *nachgiebige Lagerung* als Fügehilfe ermöglicht. Ein elektromagnetischem Greifer wäre starr. Hier müsste der Greifer folglich selbst schwimmend gelagert sein. Außerdem wäre ein Schutz der empfindlichen Spiegeloberfläche notwendig, wenn der Magnet die darunter liegende Stahlkonstruktion anzieht. Mechanische Greifer müssten unter die Spiegelfacetten greifen, sollte nach wie vor von Oben gegriffen werden. Dies sorgt gegenüber dem Vakkumgreifer zu einem konstruktiven Mehraufwand.

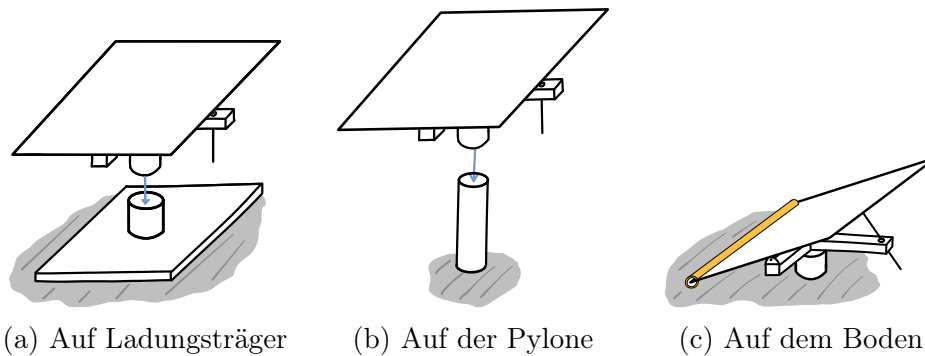


Abbildung 5.12.: Möglichkeiten der Ablage des Konzentrators im Feld.

Abbildung 5.12 zeigt die verschiedenen Lösungen zur Ablage des Konzentrators. Wenn ein Ladungsträger verwendet wird, könnte dieser als Schutz beim Ablegen dienen. Als Beispiel für einen kostengünstigen und einfachen Ablageschutz, könnte alternativ eine Schutzlippe an einer Kante des Konzentrators angebracht sein. Wird der Konzentrator hingegen direkt auf der Pylone abgelegt bzw. mit dem Rohrstück in die Pylone eingeführt, kann ein Ablageschutz entfallen. Der Hauptvorteil besteht allerdings darin, dass der Konzentrator nicht erneut von einem Montagefahrzeug detektiert und angehoben werden muss. Das Montagefahrzeug kann in diesem Fall wesentlich kleiner ausfallen und müsste lediglich Roboter zum Verschrauben mitführen.

Abbildung 5.13 zeigt ein Konzept mit den zuvor beschriebenen Funktionen aufgebaut auf einen Anhänger, gezogen von einem mittelgroßen UGV (*Clearpath Robotics – Warthog*). Der Aufbau auf einem Anhänger ermöglicht die kostengünstige Vergrößerung der Nutzfläche zum Transport der sperrigen Konzentratoren.

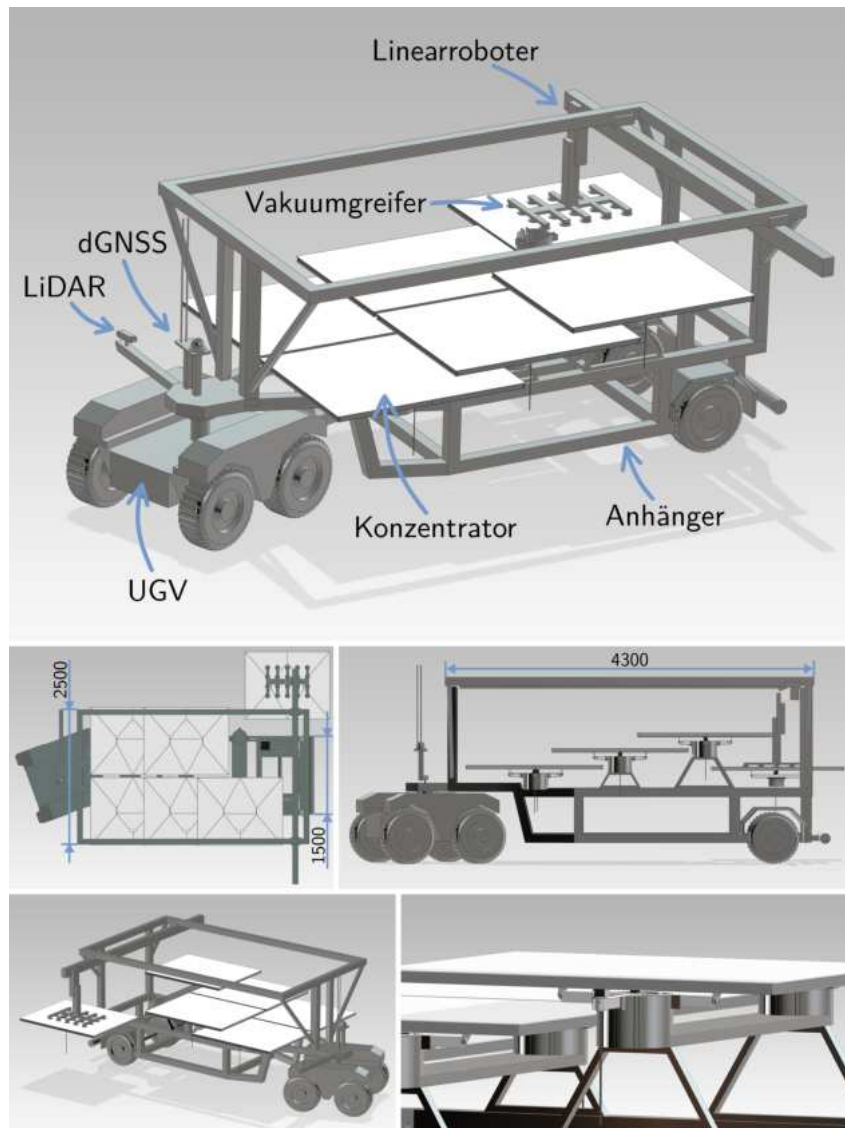


Abbildung 5.13.: Konzept eines Ablagefahrzeugs (Supply-Fahrzeug).

5.4.2. Mobile Manipulator

Am Markt sind kleine outdoor UGVs vielfältig vorhanden. Häufig werden diese bereits mit Leichtbaugelenkarmrobotern beworben. Gleichzeitig sind Schraubautomaten für Leichtbauroboter verfügbar. Entsprechend sollte hier auf ein solches Produkt zurückgegriffen werden. Die Investitionskosten sind relativ gering, da es sich um keine individualisierten Produkte handelt. Verschiedene Ausführungen der beschriebenen Bauart sind in Abbildung 5.14 und in Abbildung 4.18 in Abschnitt 4.4 dargestellt.

5. Detaillierung

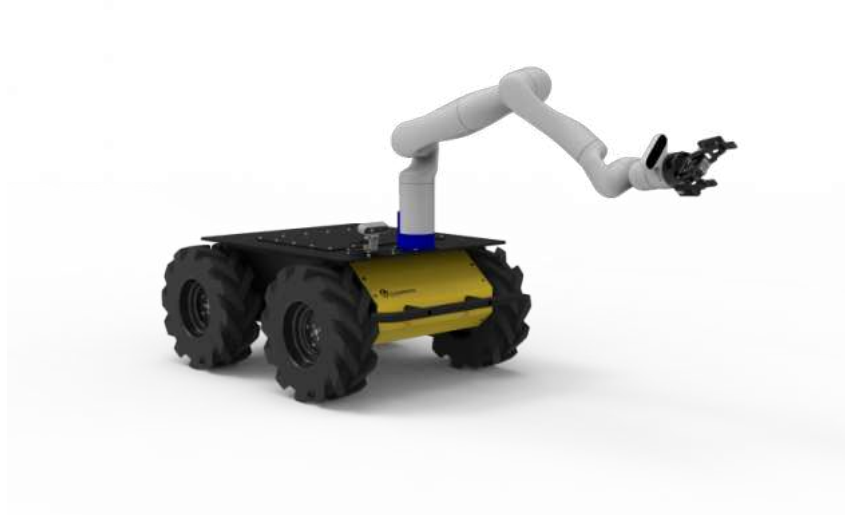


Abbildung 5.14.: UGV der Firma *Clearpath Robotics* mit Leichtbauroboter [Rob24b].

Mögliche Variablen sind die Sensorik und die Anzahl der Roboter. Hier sind Systeme mit ein oder zwei Roboter verfügbar.

Aus dem Kapitel Sensorik geht hervor, dass Lidar in Kombination mit einem GNSS System eine gute Kombination sind. GNSS dient der groben Orientierung und Steuerung. Lidar mit 3D Mapping ist für die genaue Steuerung, der Erkennung von Hindernissen und entscheidend der Erkennung der Pylone mit Konzentration sinnvoll.

Bezüglich der Anzahl der Roboter erscheinen zwei Roboter (Abbildung 4.18a) hinsichtlich der Taktzeit sinnvoll. So wird diese praktisch halbiert, während sich die Investitionskosten nicht verdoppeln, da zwar zwei Roboter mit jeweils einem Schraubautomaten, jedoch nur ein Fahrzeug beschafft werden muss. Weitere Vorteile sind das Anziehen der Dünnblechschrauben über Kreuz ohne aufwendige Bewegung des Roboterarms und der Kompensation der Anpresskräfte.

6. Fazit

In dieser Arbeit wurde ein Konzept zur automatischen Installation eines Solarfeldes eines Solarturmkraftwerks erarbeitet, um dem allgemeinen Kostendruck der erneuerbaren Energien gerecht zu werden und die Stromgestehungskosten zu senken.

Zur Ausarbeitung eines Konzepts wurden im Rahmen einer Vorkonzeptionierung verschiedene Arten von Heliostat-Fundamenten diskutiert, da diese die zur Installation notwendigen Prozessschritte maßgeblich bestimmen. Das direkte Einbringen der Pylone des Heliostaten (Teil der Stützstruktur) in den Erdboden als Pfahlgründung, wofür diese verlängert wird, hat sich hauptsächlich vor dem Hintergrund niedrigster Stückkosten als sinnvoll herausgestellt. Um die Umsetzbarkeit abzuschätzen, wurden die Windlasten für das Heliostat-Design des DLR berechnet und die Standsicherheit der Pfahlgründung bei einer in den Boden einzubringenden Pfahllänge von 1,3 m und hinsichtlich der Tragfähigkeit bei schlechten Bodenverhältnissen nachgewiesen. Die Pfahlgründung wurde als Art der Installation daraus hervorgehend für die Konzeptionierung als Grundlage festgelegt.

In der Konzeptionierung wurden verschiedene Fragestellungen diskutiert. In einem ersten Schritt wurde durch eine Recherche zum Stand der Technik von Pfahlgründungen und der Berechnung der Bodenwiderstandskräfte zum Einbringen der Pylone das Vibrationsrammen als Verfahren ausgewählt. Dies gewährleistet geringste Bauteilbelastungen, sodass mit großer Wahrscheinlichkeit die sehr dünnwandige Pylone ($d_a = 0,5 \text{ mm}$) ohne Schäden gerammt werden kann. Die Bauteilbelastung bei einer Worst-Case-Betrachtung mit sehr „festem“ Boden ergibt hier 45 %. Andere Einbringverfahren scheiden vor diesem Kontext aus. Um Beschädigungen der Pylone durch gröbere Steine im Erdboden zu verhindern, wurde ein massives Innenrohr als Knickschutz als Lösung ausgewählt, welches Teil des Spannfutters der Ramme ist und nach dem Rammen wieder entfernt wird.

Resultierend daraus folgt der zweiteilige Aufbau des Heliostaten. In Prozessschritt 1 wird der erste Teil, die Pylone, gerammt. Der zweite Teil, der Konzentrator mit der Nachführeinheit, wird anschließend auf der geramten Pylone im Feld montiert. Dieser Prozessschritt 2 behandelt das Verbinden zweier Rohrstümpfe miteinander. Als Fügeverfahren wurde vor dem Hintergrund der Kosten, der einseitigen Zugänglichkeit und der notwendigen Maschinen

6. Fazit

das Dünnschraube durch eine Detailbewertung aus einem Pool diverser möglicher Fügeverfahren als Optimum bestimmt.

Nach Bestimmung der beiden elementaren Prozessschritte, *Rammen der Pylone* und der *Konzentrator-Montage*, wurden verschiedene Materialflusskonzepte erarbeitet, um eine große Anzahl von Bauteilen – hier exemplarisch ein Solarfeld mit 2823 Heliostaten – effizient in das zu errichtende Solarfeld zu transportieren und zu installieren. Unter diesen Gesichtspunkten wurden verschiedene Trägergeräte/Fahrzeuge vorgestellt und im Rahmen der Berechnung eines Szenarios die optimale Konfiguration der Fahrzeuge bei verschiedenen Materialflusskonzepten bestimmt, wobei Investitions- und Betriebskosten in Abhängigkeit der Wegstrecken berücksichtigt wurden.

Abschließend wurde im Rahmen einer Detaillierung zwei Gestaltungsvorschläge für Fahrzeuge zum Ausführen der Prozessschritte 1 und 2 vorgestellt. Für Prozessschritt 1 ist dies ein schweres Raupenfahrzeug mit einer Vibrationsramme und einer Bevorratung von bis zu 200 Pylonen (Abbildung 5.7), das die Pylonen im Solarfeld installiert und eigenständig Nachschub aus einem Hauptlager holt. Prozessschritt 2 wird von zwei Fahrzeugen ausgeführt, wobei ein mittelgroßes autonomes Fahrzeug ca. 6 Konzentratoren direkt auf den gerammten Pylonen ablegt (Abbildung 5.13), bevor es sich eigenständig Nachschub holt. Ein zweites kleines autonomes Fahrzeug (Abbildung 5.14) schraubt die abgelegten Konzentratoren an den Pylonen fest. Für alle Fahrzeuge werden Konstruktionskonzepte bzw. am Markt verfügbare Modelle genannt. Eine Veranschaulichung des Installationsprozesses eines Solarfeldes zeigt Abbildung 6.1.

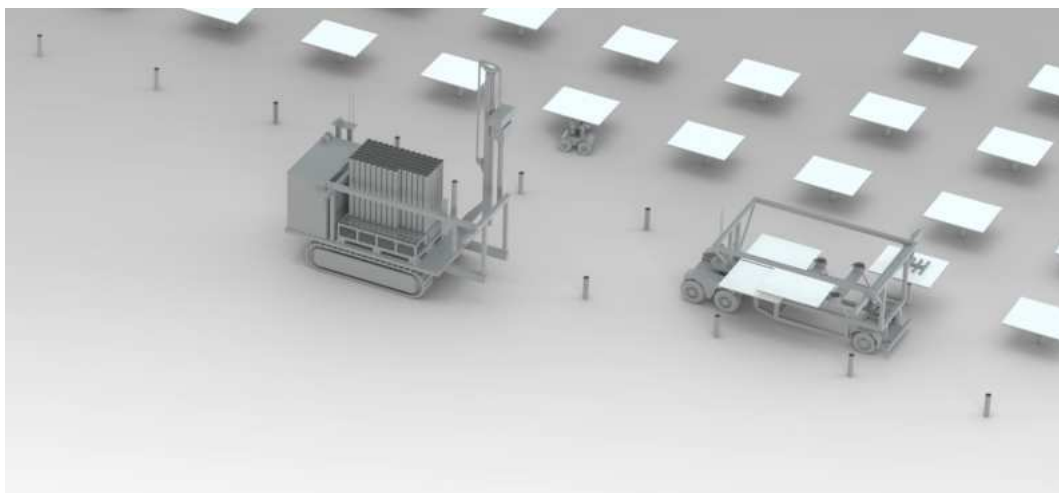


Abbildung 6.1.: Veranschaulichung des Installationsprozesses eines Solarfeldes – Rammfahrzeug (links), Schraubroboter (mittig), Ablegefahrzeug (rechts).

7. Literatur

- [AG24a] Hydramag AG. *Vibrationsramme PTC*. 2024. URL: <https://www.hydreramag.ch/de/geraete/42> [besucht am 08.08.2024].
- [AG24b] KION GROUP AG. *Autonome Outdoor-Stapler / KION GROUP AG*. Echtzeitkommunikation mit Staplern und Infrastruktur. 2024. URL: <https://www.kiongroup.com/de/News-Stories/Stories/Automatisierung/Auf-dem-Weg-zum-autonomen-Outdoor-Stapler.html> [besucht am 29.08.2024].
- [All+11] Tim Allen et al. *RE<C: Heliostat Project Overview*. Hrsg. von Google.org. Unpublished manuscript. 2011.
- [Atl24] Vermeer North Atlantic. *Vermeer PD10R*. Rent this Vermeer PD10R today. Contact Multiple Locations - Please Contact to Inquire. in Lumberton, NJ for more information. 2024. URL: <https://www.vermeernorthatlantic.com/rentals/Pile+Drivers/-Vermeer-PD10R-Lumberton-NJ-60add11daffa571893015842/> [besucht am 21.08.2024].
- [Ben+21] Daniel Benitez et al. *Solarthermische Kraftwerke: Wärme, Strom und Brennstoffe aus konzentrierter Sonnenenergie*. Köln: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., 2021.
- [Beu03] Beuth Verlag GmbH. *DIN 8593-0:2003-09, Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Berlin, 2003. DOI: 10.31030/9500684.
- [Bol19] Conrad Boley. *Handbuch Geotechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. ISBN: 978-3-658-03054-4. DOI: 10.1007/978-3-658-03055-1.
- [Bö24] Böllhoff. *QUICK FLOW® Plus selbstfurchende Blechschauben / Böllhoff*. 2024. URL: <https://www.boellhoff.com/de-de/produkte/spezialverbindungselemente/quick-flow-plus-selbstfurchende-blechschauben/> [besucht am 09.08.2024].

7. Literatur

- [Der+20] Jürgen Dersch, Simon Dieckmann, Klaus Hennecke, Robert Pitz-Paal, Michael Taylor und Pablo Ralon. „LCOE reduction potential of parabolic trough and solar tower technology in G20 countries until 2030“. In: *SOLARPACES 2019: International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems*. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2020, S. 120002. DOI: 10.1063/5.0028883.
- [DJI24] DJI. *DJI FlyCart 30 - Dynamische Zustellung aus der Luft - DJI*. Einer der Haupteinsatzbereiche der DJI FlyCart 30 ist der Warentransport. Die DJI FlyCart 30 ist eine leistungsstarke Transportdrohne für große Entfernungen. 2024. URL: <https://www.dji.com/de/flycart-30> [besucht am 29.08.2024].
- [DLR24a] DLR. *Institut für Solarforschung*. Hrsg. von Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. 2024. URL: <https://www.dlr.de/de/sf> [besucht am 25.07.2024].
- [DLR24b] DLR. *Spitzenforschung von den Grundlagen bis zur Anwendung*. Hrsg. von Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. 2024. URL: <https://www.dlr.de/de/das-dlr/ueber-uns/organisation> [besucht am 25.07.2024].
- [For13] For Construction Pros. „GPS Precisely Places Pylons For Solar Power Plant Construction“. In: [2013]. URL: <https://www.forconstructionpros.com/construction-technology/machine-grade-control-gps-laser-other/article/10852030/gps-precisely-places-pylons-for-solar-power-plant-construction> [besucht am 04.08.2024].
- [Gmb24] Stöger Automation GmbH. *Schraubautomat für Leichtbauroboter - Stöger Automation*. 2024. URL: <https://www.stoeger.com/de/schraubautomat-f%C3%BCr-leichtbauroboter.html> [besucht am 09.08.2024].
- [Hel23] Heliogen. *Heliogen demonstrates AI-powered autonomous robot, ICARUS*. 2023. URL: <https://www.heliogen.com/press-releases/heliogen-demonstrates-ai-powered-autonomous-robot-icarus-designed-to-lower-installation-and-maintenance-costs-of-full-scale-concentrated-solar-plants/> [besucht am 04.08.2024].
- [Him24] Himowa. *Raupenmaschinen für Arbeiten im Höhenbereich und zur Erdbewegung | Hinowa S.p.A*. Hinowa ist im Bereich der Herstellung von Maschinen für Arbeiten im Höhenbereich und zur Erdbe-

- wegung tätig. 2024. URL: <https://www.hinowa.com/de> [besucht am 29.08.2024].
- [Ibe23] Feyter Iberia. *Feyter Iberia / Heavy Handling and Port Equipment Specialist*. Feyter Iberia is your partner in Spain and Portugal for all your heavy handling equipment, such as big forklifts, container handlers and terminal tractors. 2023. URL: <https://www.feyter.com/iberia/en/> [besucht am 29.08.2024].
- [Jan24] Andreas Janisch. „Aktuelle Stahlpreise: Entwicklung und Prognose“. In: *Jactio.com* [2024]. URL: <https://jactio.com/stahlpreisentwicklung-aktuell/> [besucht am 27.07.2024].
- [Kem12] Hans-Georg Kempfert. *Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ - EA-Pfähle*. 2., erg. und erw. Aufl. Berlin: Ernst, 2012. ISBN: 978-3-433-03005-9.
- [KG12] Götting KG. *Fahrerloser LKW in einer Molkerei | Götting KG*. 2012. URL: <https://www.goetting.de/news/2012/molkerie> [besucht am 13.08.2024].
- [Kol19] Dimitrios Kolymbas. *Geotechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. ISBN: 978-3-662-58471-2. DOI: 10.1007/978-3-662-58472-9.
- [Kol89] Dimitrios Kolymbas, Hrsg. *Pfahlgründungen*. Berlin u. a.: Springer, 1989. ISBN: 978-3-540-51281-3. DOI: 10.1007/978-3-642-52329-8.
- [Kön14] Horst König, Hrsg. *Maschinen im Baubetrieb: Grundlagen und Anwendung*. 4., aktualisierte Aufl. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ISBN: 978-3-658-03288-3. DOI: 10.1007/978-3-658-03289-0.
- [Kon24] Konecranes. *AGV*. Automated container transport for performance-orientated terminals Konecranes Gottwald automated guided vehicles (AGVs) are unmanned, software-controlled. 2024. URL: <https://www.konecranes.com/port-equipment-services/container-handling-equipment/automated-guided-vehicles/agv> [besucht am 29.08.2024].
- [Koz24] Koza1983. *Solarwärmekraftwerk PS10 im Vordergrund. Dahinter die im Bau befindliche Anlage PS20 (Aufnahme von 2007)*. Hrsg. von Wikipedia. 2024. URL: https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Solarwärmekraftwerk_PS20&oldid=241548289 [besucht am 25.07.2024].

7. Literatur

- [Kra03] Susan Kraemer. „Over 50% of India’s renewables tender to be concentrated solar thermal“. In: *SolarPACES, Solar Power And Chemical Energy Systems* [5.03.2024]. URL: <https://www.solarpaces.org/indias-csp-tender-over-50-attracts-international-stakeholders/>.
- [Küh78] G. Kühn. „Vibrationsrammung und Bodenbeschaffenheit“. In: *Baummaschine und Bautechnik, Band 25 9* [1978].
- [Lan23] Kathrin Landsdorfer. *Was kostet Beton? ▷ Preise & Infos 2023 / Listando*. 2023. URL: <https://www.listando.de/p/was-kostet-beton/> [besucht am 27.07.2024].
- [LR07] Patrick Lammertz und Werner Richwien. „Ermittlung der Tragfähigkeit von vibrierten Stahlrohrpfählen“. In: *Pfahlsymposium*. Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Universität Duisburg-Essen, 2007.
- [Mag22] MarineConstruction Magazine. *What is a Vibratory Hammer – Marine Construction Magazine*. 2022. URL: <https://marineconstructionmagazine.com/news/what-is-a-vibratory-hammer/> [besucht am 21.08.2024].
- [MSU99] Markus Mohr, Petr Svoboda und Hermann Unger. *Praxis solarthermischer Kraftwerke*. Springer eBook Collection Computer Science and Engineering. Berlin, Heidelberg und s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 1999. ISBN: 978-3-642-63616-5. DOI: 10.1007/978-3-642-58489-3.
- [NRE23] NREL. *CSP Projects Around the World*. Hrsg. von SolarPACES. 2023. URL: <https://www.solarpaces.org/worldwide-csp/csp-projects-around-the-world/>.
- [Paj23] Pajot. *Sonnette de battage hydraulique ORTECO - Matériel Pajot*. 2023. URL: <https://www.pajot.com/materiel/sonnette-de-battage/hydraulique-orteco/> [besucht am 13.08.2024].
- [PBZ11] Andreas Pfahl, Michael Buselmeier und Martin Zäschke. „Determination of Wind Loads on Heliostats“. In: 2011.
- [Pfa+17] Andreas Pfahl, Joe Coventry, Marc Röger, Fabian Wolfertstetter, Juan Felipe Vásquez-Arango, Fabian Gross, Maziar Arjomandi, Peter Schwarzbözl, Mark Geiger und Phillip Liedke. „Progress in heliostat development“. In: *Solar Energy* 152 [2017], S. 3–37. ISSN: 0038092X. DOI: 10.1016/j.solener.2017.03.029.

- [REC24] RECA NORM GmbH. *DBS- Dünnblechschraube, Linsenkopf, vz online kaufen* / RECA Online-Shop. 2024. URL: https://shop.recanorm.de/Gesamtkatalog/DBS-Duennblechschraube-Linsenkopf-vz/1601CL02_01050903.cyid/1601.cgid/de/DE/EUR/?pgid=dqPBL0iGrw.nD8FT1vWdtxvg0000WzcUjKZg;sid=zVg5t2SkMeU4twIS_7W1vJSuowd_nQr7i3K4SECs [besucht am 09.08.2024].
- [RL80] A. A. Rodger und G. S. Littlejohn. „A study of vibratory driving in granular soils“. In: *Géotechnique* 30.3 [1980], S. 269–293. ISSN: 0016-8505. DOI: 10.1680/geot.1980.30.3.269.
- [Rob24a] Agile Robotics. *BUNKER*. AgileX Robotics has developed a full line-up of industry-leading robotics chassis that fully meet all industry requirements, including general unmanned ground vehicle (UGV), indoor global automated vehicle (AGV), and tracked chassis. 2024. URL: <https://global.agilex.ai/products/bunker#> [besucht am 29.08.2024].
- [Rob24b] Clearpath Robotics. *Husky UGV - Outdoor Field Research Robot by Clearpath*. Husky unmanned outdoor field robot is a leading UGV for all-terrain robotics research. Mobilize your research, and go where no robot has gone before. 2024. URL: <https://clearpathrobotics.com/husky-unmanned-ground-vehicle-robot/> [besucht am 18.08.2024].
- [Rob24c] Innok Robotics. *INDUROS - Der autonome Transportroboter / Innok Robotics*. Der autonome mobile Transportroboter INDUROS kann nicht nur Indoor, sondern auch Outdoor und kombiniert eingesetzt werden. 2024. URL: <https://www.innok-robotics.de/produkte/induros> [besucht am 29.08.2024].
- [Ska24] SkanCraft. *Vibrationsramme / SkanCraft*. 2024. URL: <https://skanncraft.com/produkte/vibrationsramme/> [besucht am 13.08.2024].
- [Sol24a] Solargis. *Global Solar Atlas*. Edited by The World Bank. 2024. URL: <https://globalsolaratlas.info/download/world> [besucht am 25.07.2024].
- [Sol24b] VTS Track Solutions. *Verhoeven BV*. Bei VTS Track Solutions kümmern wir uns um die Entwicklung und Produktion von Raupenlaufwerke/Raupenfahrwerke. 2024. URL: <https://www.vtstracksolutions.com/de/> [besucht am 29.08.2024].
- [Ste19] P. Stein. *Modellversuche zur Vibrationsrammung offener Stahlrohrpfähle*. Technische Universität Braunschweig, 2019.

7. Literatur

- [Sti14] Jamey Stillings. *Worldwide CSP - USA*. Hrsg. von SolarPACES. 2014. URL: <https://www.solarpaces.org/worldwide-csp/csp-potential-solar-thermal-energy-by-country/usa/>.
- [Sup24] Vermeer Equipment Suppliers. *PD10 | Mining Equipment | Vermeer Equipment Suppliers*. PD10 - Vermeer South Africa offers a wide range of New and Used Industrial Equipment. Contact Us today for a quote. 2024. URL: <https://www.vermeersouthafrica.com/product/pd10/> [besucht am 21.08.2024].
- [Syn24] Synhelion. *Press Kit DAWN Inauguration | Synhelion*. Hrsg. von SYNHELION SA. 2024. URL: <https://synhelion.com/press-kit-synhelion-dawn-inauguration> [besucht am 25.07.2024].
- [Toi14] Elad Toister. *Flexible Assembly Solar Technology (FAST) Final Technical Report*. 2014. DOI: 10.2172/1167013.
- [UA23] Günter Ullrich und Thomas Albrecht. *Fahrerlose Transportsysteme: Die FTS-Fibel - zur Welt der FTS/AMR - zur Technik - mit Praxisanwendungen - für die Planung - mit der Geschichte*. 4. Auflage. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Vieweg, 2023. ISBN: 978-3-658-38737-2.
- [VD23] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR). *Solarforschung im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt: Institutspräsentation*. Köln: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., 2023.
- [Ver19] Verein Deutscher Ingenieure e.V. *VDI 2221 Blatt 2:2019-11, Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse*. Berlin, 2019.
- [Ver98] Verein Deutscher Ingenieure e.V. *VDI 2225 Blatt 3:1998-11, Konstruktionsmethodik - Technisch - wirtschaftliches Konstruieren - Technisch - wirtschaftliche Bewertung*. 1998.
- [Weh+20] Karl-Heinz Wehking, Wolfgang Albrecht, Jörg Becker, Hans-Jörg Hager, Christian Kille, Julian Popp, Thomas Scherner und Ramin Yousefifar. *Technisches Handbuch Logistik*. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2020. ISBN: 978-3-662-60866-1.

A. Anhang

A.1. Aufgabenstellung

Konzeptentwicklung von Heliostat-Installationsfahrzeugen

Aufgabenstellung der Masterarbeit von Lars Grobelny
DLR, SF-SKT, 01.12.2023

Hintergrund

Solare Turmanlagen (Abbildung 1, links) sind eine aussichtsreiche Technologie zur regenerativen Strom- und Prozesswärme-Erzeugung. Der größte Kostenfaktor sind dabei die Spiegel, die der Sonne nachgeführt werden und das Sonnenlicht konzentrieren, die sogenannten Heliostaten¹. Beim DLR wurde ein Heliostat entwickelt, der mehr als 20% günstiger ist als bisherige² und zur Marktreife gebracht werden soll. Dabei ist eine kleine Bauweise von wenigen Quadratmetern Spiegelfläche besonders kostengünstig. Für niedrige Gesamtkosten muss die Installation dann allerdings automatisiert erfolgen. Daher sollen Ideen und erste Grundentwürfe für autonome Installationsfahrzeuge gefunden und erstellt werden.



Abbildung 1: Solarturm Jülich des DLR (links), Installation von Heliostat-Pylonen von BSE mittels Ramm-Verfahren (rechts)

Zur Verankerung der Heliostaten mit dem Boden kommen vor allem zwei Verfahren zur Anwendung: Befestigung an einem Betonfundament oder Einrammen des Stützrohres, Pylone genannt (Abbildung 1, rechts). Das Ramm-Verfahren ist besonders kostengünstig. Es ist zwar nicht für alle Bodenverhältnisse geeignet, jedoch für die meisten, daher soll dieses Verfahren genutzt werden. Bei Böden mit größeren Steinen erfolgt das Einrammen unter Vibrationen, die den Boden gewissermaßen „verflüssigen“³.

¹ A. Pfahl, J. Coventry, M. Röger, F. Wolfertstetter, F. Vasquez, F. Gross, M. Arjomandi, P. Schwarzbözl, M. Geiger, and P. Liedke. "Progress in Heliostat Development". *Solar Energy* (152), pp. 3-37, 2017, <https://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.029>.

² A. Pfahl and V. Dohmen, "Low-Cost Materials for Heliostats". *SolarPACES 2023*, Sydney.

³ S. Huss, "Systems and Methods for Inserting Support Members into the Ground". *International Patent WO2012095785A1*, 2012.

Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung umfasst folgende Punkte:

- Rammrohr-Verfahren
 - Ermittlung der Bodenverhältnisse typischer Solarstandorte
 - Literatur- und Patent-Recherche Rammrohr-Verfahren
 - Entwicklung eigener Ideen
 - Ggf. einfache Versuche zur Prüfung der Eignung eines Verfahrens
 - Bewertung und Auswahl des geeignetsten Verfahrens
- Befestigung Spiegelträger
 - Literatur- und Patentrecherche
 - Entwicklung eigener Ideen
 - Bewertung und Auswahl
- Autonome Vehikel
 - Anforderungen hinsichtlich Autonomie festlegen
 - Literatur- und Patent-Recherche
 - Suche nach neuen Ansätzen
 - Ggf. Zusammenarbeit mit DLR-Institut für Robotik und Mechatronik (Geländerobotik)
 - Entwicklung eines Fahrzeugkonzepts
- Installations-Prozess
 - Festlegung der erforderlichen Prozess-Schritte
 - Zusammenstellung möglicher Prozess-Abläufe inkl. mehrere verschiedene Fahrzeuge
 - Abschätzung der Installations-Zeiten und -Kosten
 - Auswahl des insgesamt günstigsten Installations-Prozesses
- Installations-Fahrzeug-Konzepte
 - Entwicklung von Varianten
 - Bewertung und Auswahl
 - Erstellung von einfachen CAD-Skizzen der ausgewählten Gesamtlösung

A.2. Anforderungsliste

DLR		Anforderungsliste	Version 4
Datum	F/W	Anforderung	Verantw.
Allgemein			
11.03.2024	F	Ziel: Geringstmögliche Installationskosten pro Heliostat	DLR
	F	Konzeptentwicklung für das Heliostat-Design des DLR (Abbildung 1.15, 1.16)	DLR
	F	Konzeptentwicklung am Beispiel des in Abbildung 4.12 abgebildeten Solarfeldes	DLR
	F	Toleranz für Platzierung des Heliostaten im Feld $\pm 10 \text{ mm}$	DLR
	F	Optimierung der Heliostat-Konstruktion für den Installationsprozess ohne nennenswerte Fertigungskostensteigerung je Heliostat	DLR
	W	Hoher Automatisierungsgrad	DLR
03.04.2024	F	Winkelabweichung des Heliostaten im Vergleich zur Lotrechten Aufstellung $< 5^\circ$	DLR
24.04.2024	F	Zweiteilige Installation des Heliostaten – 1. Pylone, 2. Konzentrator	DLR
Gelände- und Umweltbedingungen			
11.03.2024	F	Trockener, fester, steppen- bis wüstenartiger Boden (Orte mit hoher <i>Direct Normal Irradiation</i>)	DLR
21.03.2024	F	Unbekannte Baugrundverhältnisse/Universelle Konzeptionierung	L. G.
	F	Konzeptionierung für ebene/planierte Fläche ohne Vegetation	DLR
	F	Ohne Berücksichtigung von Wetterbedingungen (Annahme: Installation nur bei günstigen Wetterverhältnissen)	DLR
Einbringen Vibrationsrammen der Pylone (Prozessschritt 1)			
08.04.2024	F	Einbringen der dünnwandigen Pylone der Länge 2 – 2,5 m (eingebundene Länge 1,3 – 1,8 m) mit $d_a = 140 \text{ mm}$, $s = 0,5 \text{ mm}$	DLR
08.04.2024	F	Toleranz für Platzierung des Pfahls/der Pylone im Feld $\pm 10 \text{ mm}$	DLR

Fortsetzung...

A. Anhang

Datum	F/W	Anforderung	Verantw.
11.04.2024	F	Winkelabweichung des Pfahls/der Pylone im Vergleich zur lotrechten Aufstellung < 5°	DLR
24.04.2024	W	Kurze Taktzeit	L. G.
	F	Verhindern des Knickens/Beulen der Pylone	DLR
	F	Vibrationsrammen der dünnwandigen Pylone der Länge 2 – 2,5 m (eingebundene Länge 1,3 – 1,8 m) mit $d_a = 140$ mm, $s = 0,5$ mm	L. G.
	F	Verhindern des Knickens/Beulen der Pylone beim Vibrationsrammen durch ein massives Innenrohr	L. G.
	F	Vertikale Führung der Vibrationsramme	L. G.
	F	Rammkraft der Vibrationsramme mindestens 70 kN	L. G.
Fügeprozess (Prozessschritt 2)			
25.04.2024	F	Fügen von Konzentrator und Pylone (entspricht Fügen von zwei Rohrstümpfen)	DLR
25.04.2024	F	Geringe Toleranzanforderungen an die zu fügenden Bauteile	DLR
	F	Geringe Betriebskosten – z.B. Energie, Verbrauchsmittel usw.	DLR
	W	Geringes Gewicht der notwendigen Maschinen	DLR
	F	Kurze Taktzeit	DLR
	F	Hohe Prozesssicherheit auch unter Umweltbedingungen	DLR
	F	Möglichst geringe Taktzeit	DLR
	W	Geringe/Keine Umweltbelastung – z.B. Emissionen	DLR
14.05.2024	W	Trennbare oder bedingt trennbare Verbindung	DLR
	F	Lebensdauer der Verbindung von ca. 25 Jahren	DLR
	F	Spielfreie Verbindung	DLR
	F	Fügen von Konzentrator und Pylone mittels Dünnblechschraube durch Schraubautomat	L. G.
	W	Schraubautomat für Verwendung an Leichtbauroboter	L. G.
	F	Ein- oder Aufstecken des konzentratorseitigen Rohrstumpfs in/auf die Pylone	L. G.
Installationsprozess und Materialfluss			
14.05.2024	F	Transport von Pylonen, Konzentratoren, Vibrationsramme und Schraubautomat (Dünnblechschrauben)	DLR

Fortsetzung...

A.2. Anforderungsliste

Datum	F/W	Anforderung	Verantw.
	F	Effizienter, schlanker Materialfluss mit hoher Gesamtauslastung (kostensparend)	DLR
Randbedingungen Berechnungsszenario			
15.05.2024	F	Projektzeitraum 10 Jahre	DLR
	F	200 Arbeitstage pro Jahr mit je 10 Arbeitsstunden	DLR
	F	Berechnung am Beispiel des vom DLR gegebenen Solarfelds (Abbildung 4.13)	DLR
Trägergeräte/Fahrzeuge			
24.04.2024	F	Trägergerät der Ramme: Nutzlast min. 8 t, stabile Lage zum Verhindern von Schwingungen und Neigung (z.B. steifes Fahrwerk)	L.G.
25.04.2024	W	Automatisches Fahren	DLR
	F	Optimiert für Stop-and-Go Betrieb	L.G.
	W	Gute Manövrierbarkeit/genauere Steuerbarkeit	L.G.
	F	Off-Highway tauglich (vgl. Geländebedingungen)	L.G.
14.05.2024	F	Gute Transportfähigkeit durch Schiff und LKW oder selbstfahrend	L.G.
	W	Zuverlässigkeit, Ersatzteilverfügbarkeit und/oder Redundanz (z.B. mehrere Fahrzeugen)	L.G.
Navigation, Sensorik und automatisches Fahren			
11.03.2024	F	Anwendbarkeit im Außeneinsatz	DLR
08.04.2024	F	Toleranz des Heliostaten/Pfahls muss erreicht werden (vgl. Vibrationsrammen)	DLR
01.07.2024	F	Einfache/Zügige Inbetriebnahme	DLR
	F	Kein Personenverkehr auf der Baustelle. Keine Hindernisse, wie Vegetation.	DLR
Legende: DLR – Deutsches Zentrum für Luft - und Raumfahrt e. V. L. G. – Lars Grobelny Letztes Änderungsdatum: 1. Juli 2024			

A.3. Literatúrauszüge

Tabelle 5.1 Spannen der Erfahrungswerte für den charakteristischen Pfahlspitzendruck $q_{b,k}$ für Fertigrampfpfähle aus Stahlbeton und Spannbeton in nichtbindigen Böden

Bezogene Pfahlkopfsetzung s/D_{eq}	Pfahlspitzendruck $q_{b,k}$ [kN/m ²]		
	bei einem mittleren Spitzenwiderstand q_c der Drucksonde [MN/m ²]		
	7,5	15	25
0,035	2.200–5.000	4.000–6.500	4.500–7.500
0,100	4.200–6.000	7.600–10.200	8.750–11.500

Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.

Tabelle 5.2 Spannen der Erfahrungswerte für die charakteristische Pfahlmantelreibung $q_{s,k}$ für Fertigrampfpfähle aus Stahlbeton und Spannbeton in nichtbindigen Böden

Setzung	Pfahlmantelreibung $q_{s,k}$ [kN/m ²]		
	bei einem mittleren Spitzenwiderstand q_c der Drucksonde in [MN/m ²]		
	7,5	15	25
$s_{sg'}$	30–40	65–90	85–120
$s_{sg} = s_g = 0,1D_{eq}$	40–60	95–125	125–160

Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.

Tabelle 5.3 Spannen der Erfahrungswerte für den charakteristischen Pfahlspitzendruck $q_{b,k}$ für Fertigrampfpfähle aus Stahlbeton und Spannbeton in bindigen Böden

Bezogene Pfahlkopfsetzung s/D_{eq}	Pfahlspitzendruck $q_{b,k}$ [kN/m ²]		
	Scherfestigkeit $c_{u,k}$ des undränierten Bodens [kN/m ²]		
	100	150	250
0,035	350–450	550–700	800–950
0,100	600–750	850–1.100	1.150–1.500

Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.

Tabelle 5.4 Spannen der Erfahrungswerte für die charakteristische Pfahlmantelreibung $q_{s,k}$ für Fertigrampfpfähle aus Stahlbeton und Spannbeton in bindigen Böden

Setzung	Pfahlmantelreibung $q_{s,k}$ [kN/m ²]		
	Scherfestigkeit $c_{u,k}$ des undränierten Bodens [kN/m ²]		
	60	150	250
$s_{sg'}$	20–30	35–50	45–65
$s_{sg} = s_g = 0,1D_{eq}$	20–35	40–60	55–80

Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.

Abbildung A.1.: Erfahrungswerte des Pfahlspitzenwiderstands und der Pfahlmantelreibung für bindige und nicht bindige Böden, Auszug aus EA-Pfähle [Kem12].

A. Anhang

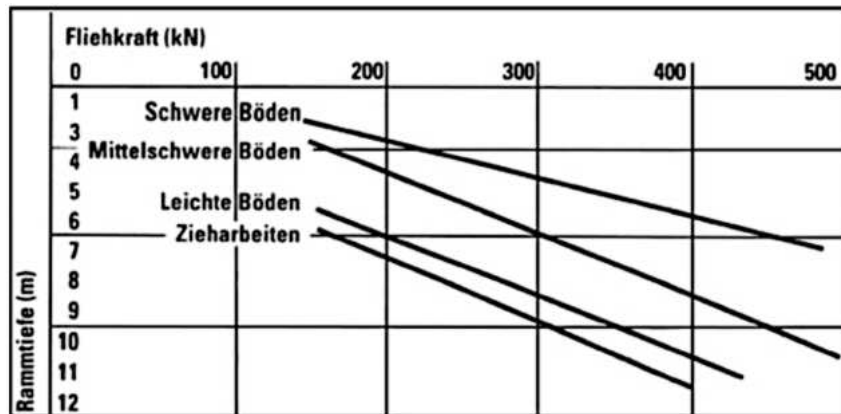
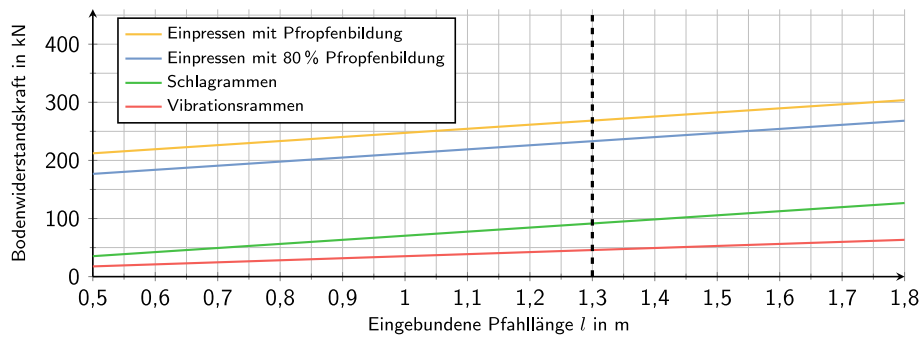
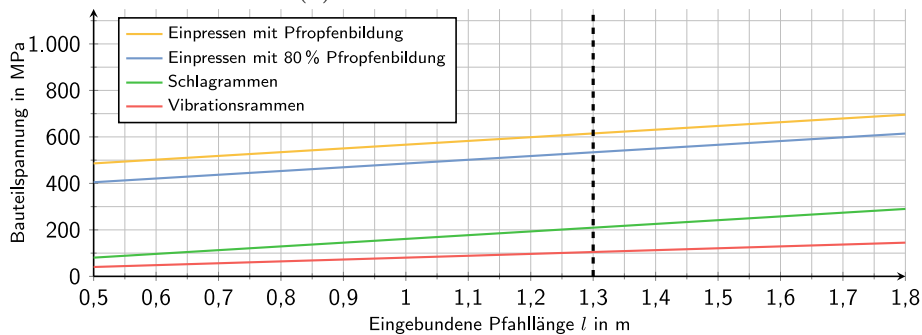


Abbildung A.2.: Rammkraft in Abhängigkeit von der Rammtiefe und Bodenart [Kön14].

A.4. Berechnungsergebnisse Rammkräfte



(a) Bodenwiderstandskraft



(b) Bauteilspannung

Abbildung A.3.: Bodenwiderstandskraft und resultierende Bauteilspannung (zugehörig zu Abschnitt 4.2).

A.5. Datenblätter



Urnäscherstrasse 54
info@hydremag.ch
Rte de Grandcour 78c

CH-9104 Waldstatt AR
www.hydremag.ch
CH-1530 Payerne VD

Tel. 071 353 77 00
Fax 071 353 77 01
Tél. 026 660 01 80
Fax 026 660 01 81

Miete ▼ Verkauf ▼ Reparatur
Location ▼ Vente ▼ Réparation



Vibrationsramme PTC Vibronneur PTC

Typ / Daten Type / Données techniques		4PHF light	4PHF	7PHF	10PHF
Baggergewicht <i>Poids de l'engin porteur</i>	t	8-18	17-28	19-32	23-35
Gewicht mit Zange <i>Poids avec pince</i>	kg	800	1020	1380	1780
Ölmenge <i>Débit d'huile</i>	l/min	100	117	145	189
Max. Betriebsdruck <i>Pression max.</i>	bar	350	350	350	350
Drehzahl <i>Vitesse de rotation</i>	U/min rpm	1800	2600	2300	2100
Zentrifugalkraft <i>Force centrifuge</i>	kN	145	302	384	493
Zugkraft <i>Force de traction</i>	kN	60	60	120	120
Transportgestell <i>Rack pour le transport</i>	kg	190	300	300	300
Leckölleitung erforderlich <i>Drain retour réservoir</i>		ja <i>oui</i>	ja <i>oui</i>	ja <i>oui</i>	ja <i>oui</i>

A. Anhang

		1PHF	4PHF	7PHF	10PHF
TECHNICAL DATA					
Eccentric moment	kg.m	0,7	4	6,5	10
Hydraulic power	kw/ch	21/28	68/91	85/114 - 107/143	110/148
Oil flow	L/min	30 - 45	105 - 160	130 - 220	170 - 230
Max. pressure	bar	350	350	350	350
Max. eccentric rotation speed	tr/min // Hz	3 000 // 50	2 600 // 43	2 300 // 38	2 100 // 35
Max. centrifugal force	kN	69	297	377	484
Max. line pull capacity	kN	25 - 60	60	120	120
Vibrating weight without clamp	kg	171 - 220	510	670 - 680	880
Total weight without clamp	kg	185 - 410	810	1 060 - 1 100	1 300
Max. amplitude vibrodriver alone	mm	7 - 8	16	19	23
Length	mm	480 - 850	1 038	1 175	920
Width	mm	430 - 540	620	608 - 615	734
Center width	mm	240	330	330	380
Height without clamp	mm	450 - 713	810	1 018 - 1 080	1 077
RECOMMENDED CLAMPS					
Sheetpiles		Agriplex 22 t	Agriplex 60 t	Agriplex 60 t	Agriplex 60 t
Clamps total weight	kg	88	265-305	265-305	265-305
Clamps height	mm	309	479	479	479
Tubes		-	-	2 clamps 42 t with beam 1,2 m	2 clamps 42 t with beam 1,2 m
Diameter min. / max.	mm	-	-	250 / 1 000	250 / 1 000
Clamps total weight	kg	-	-	750	750
Clamps height	mm	-	-	472	472
Concrete and wooden piles		-	-	-	Multigrip 60 t
ACCESSORIES & CONTROL					
Gooseneck		-	-	Yes	Yes
Custom-made fork attachment		-	Yes	Yes	Yes
Storage support		Yes	No	Yes	Yes
Flow limiter		Yes	Option	Option	Yes
Forced lubrication		No	No	No	No
Hydraulic control		Option	Yes	Yes	Yes

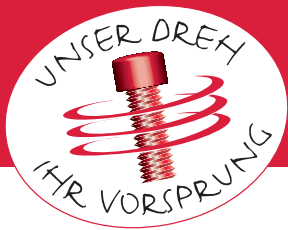
Abbildung A.4.: Auszüge aus der Broschüre der Firma *PTC Fayat Group* für Vibrationsrammen, erster Teil.



Abbildung A.5.: Auszüge aus der Broschüre der Firma *PTC Fayat Group* für Vibrationsrahmen, zweiter Teil.

RSX

Schraubeinheit für Leichtbauroboter



Der RSX wurde für den Robotereinsatz entwickelt und ist aufgrund seines sehr niedrigen Gewichts bereits für Leichtbauroboter ab 3 kg geeignet.

Die Schraubeinheit ist ESD-ableitfähig nach DIN EN 61340-5-1. Dadurch ist der RSX auch für Schraubfälle in Elektro- und Elektronikwendungen einsetzbar. Die Zuführung des Verbindungselements erfolgt per Schlauch. Alternativ dazu wird eine Pick&Place-Lösung angeboten.

Für das Schrauben in allen Positionen ohne Halteluft wurde eine Fixiereinrichtung für das Verbindungselement integriert. Für die gängigen Roboter-Modelle stehen passende Adapter zur Verfügung. Mit dem RSX können auch Muttern und andere Verbindungselemente verschraubt werden.

138



Für schwer zugängliche Schrauborte kann die Einheit mit einem Vakuummodul ausgestattet werden.

DIE VORTEILE AUF EINEN BLICK:

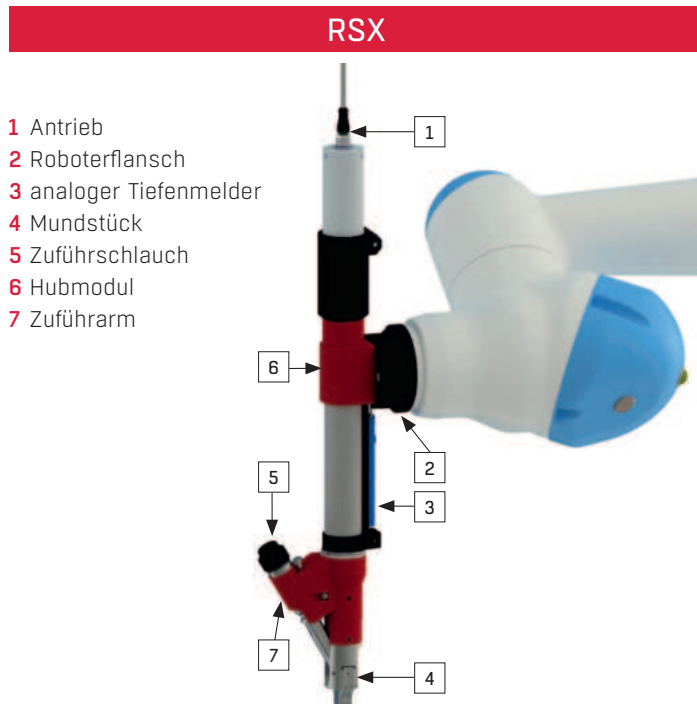
- + Für Roboter ab 3 kg Tragkraft geeignet
- + Kompakte Bauweise
- + Geringes Gewicht
- + Automatische Zuführung des Verbindungselements
- + Offene Antriebsschnittstelle (elektrisch / pneumatisch), Typ und Fabrikat frei wählbar
- + Schnittstellen für Signal- und Datenaustausch
- + Analoges Wegmesssystem
- + Hohe Verfügbarkeit
- + Schneller Bitwechsel ohne Werkzeug

Technische Daten

RSX	
Schraubengröße	M2 – M8*
Muttergröße	M2 – M8*
Gewicht (ohne Antrieb)	ca. 1,9 kg
Drehmoment	bis 16 Nm
Anpresskraft Werkzeughub	10-70 N
Schallpegelmesswert	ca. 50 dB(A)
Taktzeit	ab 0,8 sec.
Vakuumausführung	ja
Bitwechsel	Nach unten, < 10 sec.
Länge (ohne Antrieb)	ca. 400 mm

* Standard, weitere Größen auf Anfrage

Baugruppen



Interaktionsszenarien bei Roboteranwendungen

<p>Ko-Existenz: Mensch und Roboter halten sich zeitgleich in benachbarten Bereichen auf. Beispiel ist eine Einlegestation mit Drehteller an einer Roboterzelle.</p>	<p>Kooperation: Mensch und Roboter teilen sich einen Arbeitsraum, arbeiten darin aber zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Der Arbeitsbereich ist abgesichert.</p>	<p>Kollaboration: Mensch und Roboter teilen sich zum gleichen Zeitpunkt denselben Arbeitsraum. Nach DIN EN 10218-1 und ISO TS 15066 wird zwischen 4 Arten der Kollaboration unterschieden:</p> <table border="1"> <tr> <td>Sicherheitsbewerteter überwachter Halt</td> <td>Handführung</td> <td>Leistungs- und Kraftbegrenzung</td> <td>Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung</td> </tr> </table>	Sicherheitsbewerteter überwachter Halt	Handführung	Leistungs- und Kraftbegrenzung	Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung
Sicherheitsbewerteter überwachter Halt	Handführung	Leistungs- und Kraftbegrenzung	Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung			
Passende Schraubsysteme von STÖGER AUTOMATION						
<p>RSX SRS (SES-Serie) SRL (SEL-Serie)</p>	<p>RSX SRS (SES-Serie) SRL (SEL-Serie)</p>	<p>RSX CSX SRS (SES-Serie) SRL (SEL-Serie)</p>	<p>RSX CSX SRS (SES-Serie)</p>	<p>CSX</p>	<p>RSX CSX</p>	

CAD-Daten finden Sie auf www.stoeger.com/de/downloads.html im Reiter Schraubautomaten

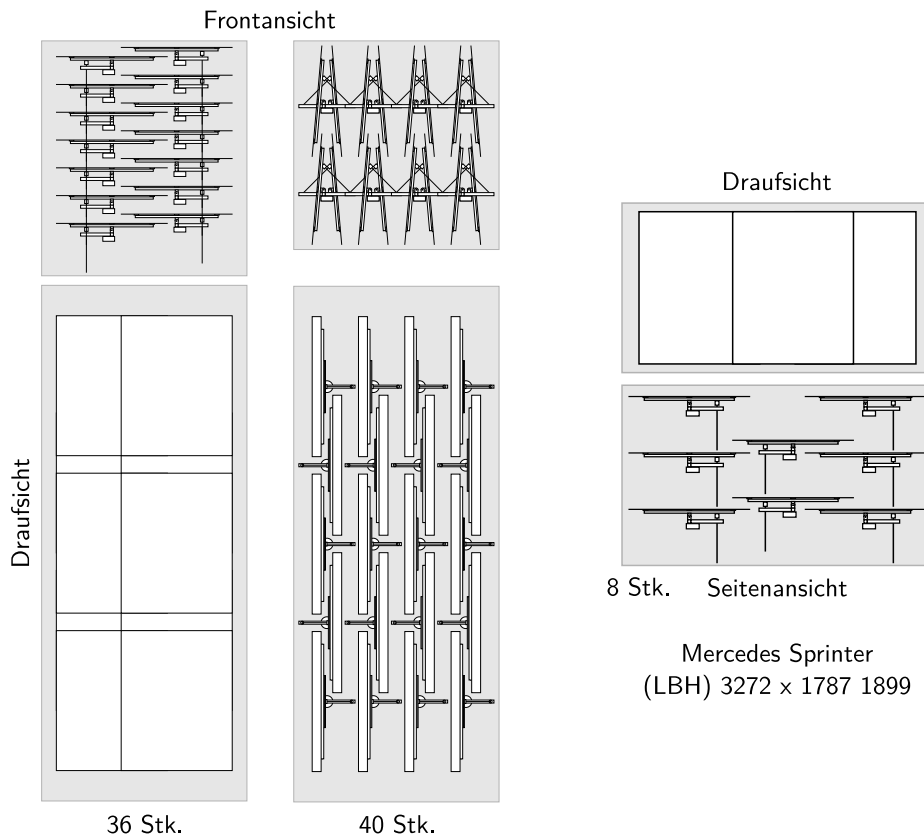
STÖGER AUTOMATION GmbH Telefon: +49 8179 997 67-0
 Gewerbering am Brand 1 info@stoeger.com
 82549 Königsdorf www.stoeger.com



S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH		
Automatisch		Ladegröße	20		Allgemein				Montage Fahrzeug								
Lagerkoordinaten					Anzahl der Heliostaten			2823	Wegstrecke			8,83 km					
x	y				Anzahl der Beladevorgänge			141 >>Zeitbedarf:	21150 s			Wegzeit			14007,20 s		
0		0		Gesamtfahrstrecke			22,84 km	5,875 h			233,45341 min			3,89089016 h			
Montagefahrzeugdaten																	
Anschaffungskosten		180.000,00 €		Optimale Montagezeit (gem. Taktz.)			126927,20 s		Minimale Taktzeit Montage (mit Weg)			44,05 s					
Energieverbrauch		4 l/h					2115,45341 min		Mittlere Taktzeit Montage (mit Weg)			44,96 s					
Energiekosten		1,50 €					35,26 h										
							1,47 d										
mittlere Geschw.		20 km/h		Reale Montagezeit (inkl. Wartezeiten u.			126927 s										
		5,56 m/s					2115,5 min										
Beschleunigung		0,5 m/s^2					35,26 h										
Supply Fahrzeug																	
Beschleunigungszeit		11,11 s					1,47 d										
Beschleunigungsweg		30,86 m		Max. Zeit bis Stillstand			921,41 s										
							15,3568238 min										
Zubringfahrzeugdaten																	
Anschaffungskosten		130.000,00 €		Maximale Fahrstrecke (Hin+Zurück)			301,55 m		Durchschnittl. Fahrstrecke (Hin+Zurück)			162,00 m					
Energieverbrauch		0,3 kWh/km		Maximale Fahrzeit (Hin+Zurück)			106 s		Durchschnittl. Fahrzeit (Hin+Zurück)			31 s					
Energiekosten		0,25 €		Maximale Zeit (Fahrt+Beladen)			1,76 min		Durchschnittl. Zeit (Fahrt+Beladen)			0,52 min					
mittlere Geschwindigkeit		12 km/h					404 s		Durchschnittl. Zeit (Fahrt+Beladen)			362 s					
		3,33 m/s					6,73 min					6,03 min					
Beschleunigung		0,5 m/s							Durchschnittliche Gesamtaktzeit			44,96 s					
Beschleunigungszeit		6,67 s		Notw. Anz. von Fahrzeuge (ohne Stillst			0,45 ungerundet										
Beschleunigungsweg		11,11 m		Durchschnittlich benötigte Anzahl			0,40 ungerundet										
Elektrisch		0		Anzahl der Fahrzeuge (Eingabe			1 Stk										
Betriebszeit		8 h		Fahrleistung pro Fahrzeug			22,84 km										
Ladezeit		2,5 h		Durschnittliche Geschw. (inkl. Beladen)			1,61 km/h										
				Betriebszeit (inkl. Beladen)/Fahrzeug			51025 s										
Taktzeitannahmen																	
Geschätzte Wegstrecke							850,4 min										
zur Platzierung		3 m					14,17 h										
Taktzeit (nur Montage)		40 s		Ladezeit gesamt			0,6 d										
Beladezeit der Maschine		120 s					0,00 h										
Beladezeit des Zubringers		30 s															
Kosten																	
Zubringer pro Stück																	
Anschaffungskosten		130.000 €															
Energieverbrauch pro Stk		6,85 kWh															
Energiekosten		1,71 €															
Maschine																	
Anschaffungskosten		180.000 €															
Energieverbrauch		141,03 l															
Energiekosten		211,55 €															

Abbildung A.7.: Veranschaulichung eines Berechnungsskripts der Szenarioberechnung Teil 2 (exempl. Manueller eStapler + 7,5t-LKW).

Fahrzeugannahmen



Innenmaße:

20 Fuß ISO Container (LxBxH): 5898 x 2352 x 2390

20 Fuß High Cube ISO Container (LxBxH): 5898 x 2352 x 2390

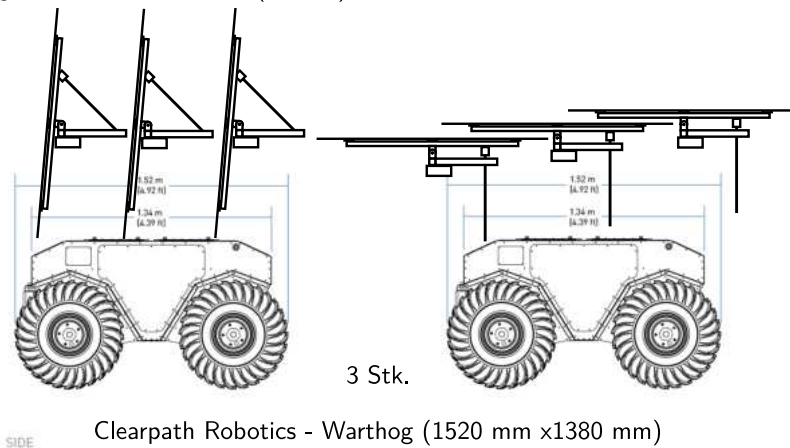


Abbildung A.8.: Abschätzung der Ladekapazitäten von Konzentratoren durch maßstabsgetreue Zeichnungen (exemplarische Abb.) [Rob24b].

Konzentrator-Montage

Konzept I

40t-LKW	7,5t-LKW	7,5t-eLKW	Sonderbau UGV (groß)																																																																																										
40t-LKW	7,5t-LKW (z.B. Isuzu N-Series, Mitsubishi Fuso)	7,5t- eLKW (z.B. Mitsubishi Fuso eCanter)	Sonderbau UGV (groß)																																																																																										
Allgemein	Allgemein	Allgemein	Allgemein																																																																																										
Anschaffungskosten 85.000 €	Anschaffungskosten 40.000 €	Anschaffungskosten 65.000 €	Anschaffungskosten 250.000 €																																																																																										
Energieverbrauch 8 l/h	Energieverbrauch 4 l/h	Energieverbrauch 0,79 kWh/km	Energieverbrauch 3 kW																																																																																										
Mittlere Geschwindigkeit 20 km/h	Mittlere Geschwindigkeit 20 km/h	Mittlere Geschwindigkeit 20 km/h	Mittlere Geschwindigkeit 6 km/h																																																																																										
Beschleunigung 0,5 m/s ²	Beschleunigung 0,5 m/s ²	Beschleunigung 0,5 m/s ²	Beschleunigung 0,5 m/s ²																																																																																										
Ladung	Ladung	Ladung	Ladung																																																																																										
Ladegröße 60	Ladegröße 20	Ladegröße 20	Ladegröße 10																																																																																										
Beladung der Maschine 180 s	Beladung der Maschine 120 s	Beladung der Maschine 120 s	Beladung der Maschine 60 s																																																																																										
Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Ja	Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Ja	Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Ja	Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Nein																																																																																										
Aufbauten	Aufbauten	Aufbauten	Aufbauten																																																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Typ</th> <th>Anz./Fahrz.</th> <th>Kosten</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Portalroboter</td> <td>1</td> <td>10.000 €</td> </tr> <tr> <td>Schraubautomat</td> <td>1</td> <td>10.000 €</td> </tr> <tr> <td>Gelenkarmroboter</td> <td>1</td> <td>15.000 €</td> </tr> <tr> <td>Strukturkosten</td> <td>1</td> <td>15.000 €</td> </tr> <tr> <td>Autonomiekit</td> <td>1</td> <td>100.000 €</td> </tr> <tr> <td>Summe</td> <td></td> <td>150.000 €</td> </tr> <tr> <td>Gesamtkosten</td> <td></td> <td>235.000 €</td> </tr> </tbody> </table>	Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	Portalroboter	1	10.000 €	Schraubautomat	1	10.000 €	Gelenkarmroboter	1	15.000 €	Strukturkosten	1	15.000 €	Autonomiekit	1	100.000 €	Summe		150.000 €	Gesamtkosten		235.000 €	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Typ</th> <th>Anz./Fahrz.</th> <th>Kosten</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Portalroboter</td> <td>1</td> <td>10.000 €</td> </tr> <tr> <td>Schraubautomat</td> <td>1</td> <td>10.000 €</td> </tr> <tr> <td>Gelenkarmroboter</td> <td>1</td> <td>15.000 €</td> </tr> <tr> <td>Autonomiekit</td> <td>1</td> <td>100.000 €</td> </tr> <tr> <td>Strukturkosten</td> <td>1</td> <td>5.000 €</td> </tr> <tr> <td>Summe</td> <td></td> <td>140.000 €</td> </tr> <tr> <td>Gesamtkosten</td> <td></td> <td>180.000 €</td> </tr> </tbody> </table>	Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	Portalroboter	1	10.000 €	Schraubautomat	1	10.000 €	Gelenkarmroboter	1	15.000 €	Autonomiekit	1	100.000 €	Strukturkosten	1	5.000 €	Summe		140.000 €	Gesamtkosten		180.000 €	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Typ</th> <th>Anz./Fahrz.</th> <th>Kosten</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Portalroboter</td> <td>1</td> <td>10.000 €</td> </tr> <tr> <td>Schraubautomat</td> <td>1</td> <td>10.000 €</td> </tr> <tr> <td>Gelenkarmroboter</td> <td>1</td> <td>15.000 €</td> </tr> <tr> <td>Autonomiekit</td> <td>1</td> <td>100.000 €</td> </tr> <tr> <td>Strukturkosten</td> <td>1</td> <td>5.000 €</td> </tr> <tr> <td>Summe</td> <td></td> <td>140.000 €</td> </tr> <tr> <td>Gesamtkosten</td> <td></td> <td>205.000 €</td> </tr> </tbody> </table>	Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	Portalroboter	1	10.000 €	Schraubautomat	1	10.000 €	Gelenkarmroboter	1	15.000 €	Autonomiekit	1	100.000 €	Strukturkosten	1	5.000 €	Summe		140.000 €	Gesamtkosten		205.000 €	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Typ</th> <th>Anz./Fahrz.</th> <th>Kosten</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Portalroboter</td> <td>1</td> <td>10.000 €</td> </tr> <tr> <td>Schraubautomat</td> <td>1</td> <td>10.000 €</td> </tr> <tr> <td>Gelenkarmroboter</td> <td>1</td> <td>15.000 €</td> </tr> <tr> <td>Summe</td> <td></td> <td>35.000 €</td> </tr> <tr> <td>Gesamtkosten</td> <td></td> <td>285.000 €</td> </tr> </tbody> </table>	Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	Portalroboter	1	10.000 €	Schraubautomat	1	10.000 €	Gelenkarmroboter	1	15.000 €	Summe		35.000 €	Gesamtkosten		285.000 €
Typ	Anz./Fahrz.	Kosten																																																																																											
Portalroboter	1	10.000 €																																																																																											
Schraubautomat	1	10.000 €																																																																																											
Gelenkarmroboter	1	15.000 €																																																																																											
Strukturkosten	1	15.000 €																																																																																											
Autonomiekit	1	100.000 €																																																																																											
Summe		150.000 €																																																																																											
Gesamtkosten		235.000 €																																																																																											
Typ	Anz./Fahrz.	Kosten																																																																																											
Portalroboter	1	10.000 €																																																																																											
Schraubautomat	1	10.000 €																																																																																											
Gelenkarmroboter	1	15.000 €																																																																																											
Autonomiekit	1	100.000 €																																																																																											
Strukturkosten	1	5.000 €																																																																																											
Summe		140.000 €																																																																																											
Gesamtkosten		180.000 €																																																																																											
Typ	Anz./Fahrz.	Kosten																																																																																											
Portalroboter	1	10.000 €																																																																																											
Schraubautomat	1	10.000 €																																																																																											
Gelenkarmroboter	1	15.000 €																																																																																											
Autonomiekit	1	100.000 €																																																																																											
Strukturkosten	1	5.000 €																																																																																											
Summe		140.000 €																																																																																											
Gesamtkosten		205.000 €																																																																																											
Typ	Anz./Fahrz.	Kosten																																																																																											
Portalroboter	1	10.000 €																																																																																											
Schraubautomat	1	10.000 €																																																																																											
Gelenkarmroboter	1	15.000 €																																																																																											
Summe		35.000 €																																																																																											
Gesamtkosten		285.000 €																																																																																											
Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 5 m	Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 3 m	Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 3 m	Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 2 m																																																																																										

Konzept II

Kleines UGV + Mobiler Manipulator	Kleines UGV	Mobiler Manipulator (Bsp. MBS RoVo 2)	Kleines UGV	Mobiler Manipulator (Bsp. MBS RoVo 2)																																																																										
Kleines UGV	Kleines UGV	Mobiler Manipulator (Bsp. MBS RoVo 2)	Kleines UGV	Mobiler Manipulator (Bsp. MBS RoVo 2)																																																																										
Allgemein	Allgemein	Allgemein	Allgemein	Allgemein																																																																										
Anschaffungskosten 23.000 €	Anschaffungskosten 23.000 €	Anschaffungskosten 50.000 €	Anschaffungskosten 23.000 €	Anschaffungskosten 50.000 €																																																																										
Energieverbrauch 0,04444 kWh/km	Energieverbrauch 0,0666 kWh/km	Energieverbrauch 4,2 kW	Energieverbrauch 0,0666 kWh/km	Energieverbrauch 4,2 kW																																																																										
Mittlere Geschwindigkeit 3,6 km/h	Mittlere Geschwindigkeit 12 km/h	Mittlere Geschwindigkeit 20 km/h	Mittlere Geschwindigkeit 12 km/h	Mittlere Geschwindigkeit 20 km/h																																																																										
Beschleunigung 0,5 m/s ²	Beschleunigung 0,5 m/s ²	Beschleunigung 0,5 m/s ²	Beschleunigung 0,5 m/s ²	Beschleunigung 0,5 m/s ²																																																																										
Ladung	Ladung	Ladung	Ladung	Ladung																																																																										
Ladegröße 2	Ladegröße 2	Ladegröße 2	Ladegröße 2	Ladegröße 2																																																																										
Beladung des Zubringers 20 s	Beladung des Zubringers 20 s	Beladung des Zubringers 20 s	Beladung des Zubringers 20 s	Beladung des Zubringers 20 s																																																																										
Beladung der Maschine 20 s	Beladung der Maschine 20 s	Beladung der Maschine 20 s	Beladung der Maschine 20 s	Beladung der Maschine 20 s																																																																										
Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Nein	Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Nein	Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Nein	Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Nein	Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Nein																																																																										
Aufbauten	Aufbauten	Aufbauten	Aufbauten	Aufbauten																																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Typ</th> <th>Anz./Fahrz.</th> <th>Kosten</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Portalroboter/Struktur</td> <td>1</td> <td>10.000 €</td> </tr> <tr> <td>RTK/LiDar</td> <td>1</td> <td>5.000 €</td> </tr> <tr> <td>Summe</td> <td></td> <td>15.000 €</td> </tr> <tr> <td>Gesamtkosten</td> <td></td> <td>38.000 €</td> </tr> </tbody> </table>	Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	Portalroboter/Struktur	1	10.000 €	RTK/LiDar	1	5.000 €	Summe		15.000 €	Gesamtkosten		38.000 €	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Typ</th> <th>Anz./Fahrz.</th> <th>Kosten</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Portalroboter</td> <td>1</td> <td>10.000 €</td> </tr> <tr> <td>Schraubautomat</td> <td>1</td> <td>10.000 €</td> </tr> <tr> <td>Gelenkarmroboter</td> <td>1</td> <td>15.000 €</td> </tr> <tr> <td>RTK/LiDar</td> <td>1</td> <td>10.000 €</td> </tr> <tr> <td>Summe</td> <td></td> <td>45.000 €</td> </tr> <tr> <td>Gesamtkosten</td> <td></td> <td>95.000 €</td> </tr> </tbody> </table>	Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	Portalroboter	1	10.000 €	Schraubautomat	1	10.000 €	Gelenkarmroboter	1	15.000 €	RTK/LiDar	1	10.000 €	Summe		45.000 €	Gesamtkosten		95.000 €	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Typ</th> <th>Anz./Fahrz.</th> <th>Kosten</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Portalroboter/Struktur</td> <td>1</td> <td>10.000 €</td> </tr> <tr> <td>RTK/LiDar</td> <td>1</td> <td>5.000 €</td> </tr> <tr> <td>Aufpreis für mehr Geschwindigkeit</td> <td>1</td> <td>15.000 €</td> </tr> <tr> <td>Summe</td> <td></td> <td>30.000 €</td> </tr> <tr> <td>Gesamtkosten</td> <td></td> <td>53.000 €</td> </tr> </tbody> </table>	Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	Portalroboter/Struktur	1	10.000 €	RTK/LiDar	1	5.000 €	Aufpreis für mehr Geschwindigkeit	1	15.000 €	Summe		30.000 €	Gesamtkosten		53.000 €	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Typ</th> <th>Anz./Fahrz.</th> <th>Kosten</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Portalroboter</td> <td>1</td> <td>10.000 €</td> </tr> <tr> <td>Schraubautomat</td> <td>1</td> <td>10.000 €</td> </tr> <tr> <td>Gelenkarmroboter</td> <td>1</td> <td>15.000 €</td> </tr> <tr> <td>RTK/LiDar</td> <td>1</td> <td>10.000 €</td> </tr> <tr> <td>Summe</td> <td></td> <td>45.000 €</td> </tr> <tr> <td>Gesamtkosten</td> <td></td> <td>95.000 €</td> </tr> </tbody> </table>	Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	Portalroboter	1	10.000 €	Schraubautomat	1	10.000 €	Gelenkarmroboter	1	15.000 €	RTK/LiDar	1	10.000 €	Summe		45.000 €	Gesamtkosten		95.000 €
Typ	Anz./Fahrz.	Kosten																																																																												
Portalroboter/Struktur	1	10.000 €																																																																												
RTK/LiDar	1	5.000 €																																																																												
Summe		15.000 €																																																																												
Gesamtkosten		38.000 €																																																																												
Typ	Anz./Fahrz.	Kosten																																																																												
Portalroboter	1	10.000 €																																																																												
Schraubautomat	1	10.000 €																																																																												
Gelenkarmroboter	1	15.000 €																																																																												
RTK/LiDar	1	10.000 €																																																																												
Summe		45.000 €																																																																												
Gesamtkosten		95.000 €																																																																												
Typ	Anz./Fahrz.	Kosten																																																																												
Portalroboter/Struktur	1	10.000 €																																																																												
RTK/LiDar	1	5.000 €																																																																												
Aufpreis für mehr Geschwindigkeit	1	15.000 €																																																																												
Summe		30.000 €																																																																												
Gesamtkosten		53.000 €																																																																												
Typ	Anz./Fahrz.	Kosten																																																																												
Portalroboter	1	10.000 €																																																																												
Schraubautomat	1	10.000 €																																																																												
Gelenkarmroboter	1	15.000 €																																																																												
RTK/LiDar	1	10.000 €																																																																												
Summe		45.000 €																																																																												
Gesamtkosten		95.000 €																																																																												
Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 2 m	Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 2 m	Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 2 m	Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 2 m	Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 2 m																																																																										

Konzentrator-Montage

Konzept II

Autonomer eStapler + 7,5t-eLKW				Autonomer eStapler + 7,5t-LKW			
Autonomer Elektro Stapler		7,5t-eLKW (z.B. Mitsubishi Fuso eCanter)		Autonomer Elektro Stapler		7,5t-LKW (z.B. Isuzu N-Series, Mitsubishi Fuso)	
Allgemein				Allgemein			
Anschaffungskosten	30.000 €	Anschaffungskosten	65.000 €	Anschaffungskosten	30.000 €	Anschaffungskosten	40.000 €
Energieverbrauch	0,3 kWh/km	Energieverbrauch	0,79 kWh/km	Energieverbrauch	0,3 kWh/km	Energieverbrauch	4 l/h
Mittlere Geschwindigkeit	12 km/h	Mittlere Geschwindigkeit	20 km/h	Mittlere Geschwindigkeit	12 km/h	Mittlere Geschwindigkeit	20 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²	Beschleunigung	0,5 m/s ²	Beschleunigung	0,5 m/s ²	Beschleunigung	0,5 m/s ²
Ladung				Ladung			
Ladegröße	20	Ladegröße	20	Ladegröße	20	Ladegröße	20
Beladung des Zubringers	30 s	Beladung des Zubringers	30 s	Beladung des Zubringers	30 s	Beladung des Zubringers	30 s
Beladung der Maschine	120 s	Beladung der Maschine	120 s	Beladung der Maschine	120 s	Beladung der Maschine	120 s
Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Nein		Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Nein		Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Nein		Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Ja	
Aufbauten				Aufbauten			
Typ	Anz./Fahrz.	Kosten		Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	
Autonomie Kit	1	100.000 €		Autonomie Kit	1	100.000 €	
		Portalroboter	1 10.000 €			Portalroboter	1 10.000 €
		Schraubautomat	1 10.000 €			Schraubautomat	1 10.000 €
		Gelenkarmroboter	1 15.000 €			Gelenkarmroboter	1 15.000 €
		Autonomie Kit	1 100.000 €			Autonomie Kit	1 100.000 €
		Strukturkosten	1 5.000 €			Strukturkosten	1 5.000 €
Summe		100.000 €		Summe		140.000 €	
Gesamtkosten		130.000 €		Gesamtkosten		130.000 €	
Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 3 m				Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 3 m			

Konzept II

Manueller eStapler + 7,5t-LKW				Greifstapler + 40t-LKW			
Manueller Elektro Stapler		7,5t-LKW (z.B. Isuzu N-Series, Mitsubishi Fuso)		Greifstapler (Reach Stacker)		40t-LKW	
Allgemein				Allgemein			
Anschaffungskosten	30.000 €	Anschaffungskosten	40.000 €	Anschaffungskosten	250.000 €	Anschaffungskosten	85.000 €
Energieverbrauch	0,3 kWh/km	Energieverbrauch	4 l/h	Energieverbrauch	25 l/h	Energieverbrauch	8 l/h
Mittlere Geschwindigkeit	12 km/h	Mittlere Geschwindigkeit	20 km/h	Mittlere Geschwindigkeit	25 km/h	Mittlere Geschwindigkeit	20 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²	Beschleunigung	0,5 m/s ²	Beschleunigung	0,5 m/s ²	Beschleunigung	0,5 m/s ²
Ladung				Ladung			
Ladegröße	20	Ladegröße	20	Ladegröße	40	Ladegröße	40
Beladung des Zubringers	30 s	Beladung des Zubringers	30 s	Beladung des Zubringers	45 s	Beladung des Zubringers	45 s
Beladung der Maschine	120 s	Beladung der Maschine	120 s	Beladung der Maschine	180 s	Beladung der Maschine	180 s
Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Ja		Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Ja		Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Ja		Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Ja	
Aufbauten				Aufbauten			
Typ	Anz./Fahrz.	Kosten		Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	
Autonomie Kit	1	100.000 €		Autonomie Kit	1	100.000 €	
		Portalroboter	1 10.000 €			Portalroboter	1 10.000 €
		Schraubautomat	1 10.000 €			Schraubautomat	1 10.000 €
		Gelenkarmroboter	1 15.000 €			Gelenkarmroboter	1 15.000 €
		Autonomie Kit	1 100.000 €			Autonomie Kit	1 100.000 €
		Strukturkosten	1 5.000 €			Strukturkosten	1 15.000 €
Summe		100.000 €		Summe		150.000 €	
Gesamtkosten		130.000 €		Gesamtkosten		235.000 €	
Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 3 m				Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 5 m			

Konzentrator-Montage

Konzept II

eGreifstapler + 40t-LKW

Elektrischer Greifstapler		40t-LKW	
Allgemein			
Anschaffungskosten	500.000 €	Anschaffungskosten	85.000 €
Energieverbrauch	30 kW	Energieverbrauch	8 l/h
Mittlere Geschwindigkeit	25 km/h	Mittlere Geschwindigkeit	20 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²	Beschleunigung	0,5 m/s ²
Ladung			
Ladegröße	40		
Beladung des Zubringers	45 s		
Beladung der Maschine	180 s		
Manuelle Bedienung (Ja/Nein)	Ja	Manuelle Bedienung (Ja/Nein)	Ja
Aufbauten			
Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	
Portalroboter	1	10.000 €	
Schraubautomat	1	10.000 €	
Gelenkarmroboter	1	15.000 €	
Autonomiekit	1	100.000 €	
Strukturkosten	1	15.000 €	
Summe		150.000 €	
Gesamtkosten		500.000 €	
Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	
Portalroboter	1	10.000 €	
Schraubautomat	1	10.000 €	
Gelenkarmroboter	1	15.000 €	
Autonomiekit	1	100.000 €	
Strukturkosten	1	15.000 €	
Summe		150.000 €	
Gesamtkosten		235.000 €	

Kleines UGV (höhere elektr. Reichweite) + Mobiler Manipulator

Kleines AGV		Mobiler Manipulator (Bsp. MBS Rovo 2)	
Allgemein			
Anschaffungskosten	23.000 €	Anschaffungskosten	50.000 €
Energieverbrauch	0,04444 kWh/km	Energieverbrauch	4,2 kW
Mittlere Geschwindigkeit	3,6 km/h	Mittlere Geschwindigkeit	20 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²	Beschleunigung	0,5 m/s ²
Ladung			
Ladegröße	2		
Beladung des Zubringers	20 s		
Beladung der Maschine	20 s		
Manuelle Bedienung (Ja/Nein)	Nein	Manuelle Bedienung (Ja/Nein)	Nein
Aufbauten			
Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	
Portalroboter/Struktur	1	10.000 €	
RTK/LiDar	1	5.000 €	
Summe		15.000 €	
Gesamtkosten		38.000 €	
Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	
Portalroboter	1	10.000 €	
Schraubautomat	1	10.000 €	
Gelenkarmroboter	1	15.000 €	
RTK/LiDar	1	10.000 €	
Summe		45.000 €	
Gesamtkosten		95.000 €	

Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 5 m

Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 2 m

Konzept III

Kleines UGV (Quasistetigförderer) + Mobiler Manipulator

Kleines AGV		Mobiler Manipulator	
Allgemein			
Anschaffungskosten	23.000 €	Anschaffungskosten	50.000 €
Energieverbrauch	0,066666 kWh/km	Energieverbrauch	4,5 kW
Mittlere Geschwindigkeit	12 km/h	Mittlere Geschwindigkeit	5 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²	Beschleunigung	0,5 m/s ²
Ladung			
Ladegröße	1		
Beladung des Zubringers	15 s		
Manuelle Bedienung (Ja/Nein)	Nein	Manuelle Bedienung (Ja/Nein)	Nein
Aufbauten			
Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	
RTK/LiDar	1	5.000 €	
Summe		5.000 €	
Gesamtkosten		28.000 €	
Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	
Portalroboter	1	10.000 €	
Schraubautomat	1	10.000 €	
Gelenkarmroboter	1	15.000 €	
Summe		35.000 €	
Gesamtkosten		85.000 €	

Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 3 m

Mittelgroßes UGV + Mobiler Manipulator

Mittelgroßes UGV		Mobiler Manipulator	
Allgemein			
Anschaffungskosten	70.000 €	Anschaffungskosten	50.000 €
Energieverbrauch	0,09 kWh/km	Energieverbrauch	4,5 kW
Mittlere Geschwindigkeit	12 km/h	Mittlere Geschwindigkeit	5 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²	Beschleunigung	0,5 m/s ²
Ladung			
Ladegröße	6		
Beladung des Zubringers	30 s		
Manuelle Bedienung (Ja/Nein)	Nein	Manuelle Bedienung (Ja/Nein)	Nein
Aufbauten			
Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	
RTK/LiDar	1	5.000 €	
Summe		5.000 €	
Gesamtkosten		75.000 €	
Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	
Portalroboter	1	10.000 €	
Schraubautomat	1	10.000 €	
Gelenkarmroboter	1	15.000 €	
Summe		35.000 €	
Gesamtkosten		85.000 €	

Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 3 m

Konzentrator-Montage

Konzept III

Großes UGV + Mobiler Manipulator

Großes UGV (Innok Robotics Routenzug)

<u>Allgemein</u>	
Anschaffungskosten	110.000 €
Energieverbrauch	0,09 kWh/km
Mittlere Geschwindigkeit	3,1 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²

Ladung

Ladegröße	12
Beladung des Zubringers	30 s

Manuelle Bedienung (Ja/Nein) **Nein**

Mobiler Manipulator

<u>Allgemein</u>	
Anschaffungskosten	50.000 €
Energieverbrauch	4,5 kW
Mittlere Geschwindigkeit	5 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²

Aufbauten

Typ	Anz./Fahrz.	Kosten
Strukturkosten	1	10.000 €
Summe 10.000 €		
Gesamtkosten		120.000 €

Typ	Anz./Fahrz.	Kosten
Portalroboter	1	10.000 €
Schraubautomat	1	10.000 €
Gelenkarmroboter	1	15.000 €
Summe 35.000 €		
Gesamtkosten		85.000 €

Geschätzte Wegstrecke der Handhabung **3 m**

Konzept IV

Kleines UGV + Mobiler Manipulator

Kleines UGV

<u>Allgemein</u>	
Anschaffungskosten	23.000 €
Energieverbrauch	0,0444 kWh/km
Mittlere Geschwindigkeit	3,6 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²

Ladung

Ladegröße	2
Beladung des Zubringers	20 s

Manuelle Bedienung (Ja/Nein) **Nein**

Mobiler Manipulator

<u>Allgemein</u>	
Anschaffungskosten	50.000 €
Energieverbrauch	4,5 kW
Mittlere Geschwindigkeit	5 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²

Aufbauten

Typ	Anz./Fahrz.	Kosten
Portalroboter	1	10.000 €
RTK/Lidar	1	5.000 €
Summe 15.000 €		
Gesamtkosten		38.000 €

Typ	Anz./Fahrz.	Kosten
Schraubautomat	1	10.000 €
Gelenkarmroboter	1	15.000 €
RTK/LiDar	1	10.000 €
Summe 35.000 €		
Gesamtkosten		85.000 €

Geschätzte Wegstrecke der Handhabung **0,5 m**

Konzept IV

Mittelgroßes UGV + Mobiler Manipulator

Mittleres AGV

<u>Allgemein</u>	
Anschaffungskosten	80.000 €
Energieverbrauch	0,09 kWh/km
Mittlere Geschwindigkeit	12 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²

Ladung

Ladegröße	6
Beladung des Zubringers	45 s

Manuelle Bedienung (Ja/Nein) **Nein**

Kleines AGV

<u>Allgemein</u>	
Anschaffungskosten	50.000 €
Energieverbrauch	4,5 kW
Mittlere Geschwindigkeit	5 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²

Aufbauten

Typ	Anz./Fahrz.	Kosten
Portalroboter	1	10.000 €
RTK/Lidar	1	5.000 €
Summe 15.000 €		
Gesamtkosten		95.000 €

Typ	Anz./Fahrz.	Kosten
Schraubautomat	1	10.000 €
Gelenkarmroboter	1	15.000 €
RTK/LiDar	1	10.000 €
Summe 35.000 €		
Gesamtkosten		85.000 €

Geschätzte Wegstrecke der Handhabung **0,5 m**

Großes UGV + Mobiler Manipulator

Großes UGV (Innok Robotics)

<u>Allgemein</u>	
Anschaffungskosten	110.000 €
Energieverbrauch	0,09 kWh/km
Mittlere Geschwindigkeit	3,1 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²

Ladung

Ladegröße	12
Beladung des Zubringers	60 s

Manuelle Bedienung (Ja/Nein) **Nein**

Mobiler Manipulator

<u>Allgemein</u>	
Anschaffungskosten	50.000 €
Energieverbrauch	4,5 kW
Mittlere Geschwindigkeit	5 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²

Aufbauten

Typ	Anz./Fahrz.	Kosten
Portalroboter	1	10.000 €
RTK/Lidar	1	5.000 €
Strukturkosten	1	10.000 €
Summe 25.000 €		
Gesamtkosten		135.000 €

Typ	Anz./Fahrz.	Kosten
Schraubautomat	1	10.000 €
Gelenkarmroboter	1	15.000 €
RTK/LiDar	1	10.000 €
Summe 35.000 €		
Gesamtkosten		85.000 €

Geschätzte Wegstrecke der Handhabung **0,5 m**

Konzentrator-Montage

Konzept IV

Sonderbau UGV (verringerte Ablagezeit) + Mobiler Manipulator

Flugdrohne + Mobiler Manipulator

Sonderbau UGV (groß)		Kleines AGV		Flugdrohne (DJI FlyCart 30)		Mobiler Manipulator	
<u>Allgemein</u>		<u>Allgemein</u>		<u>Allgemein</u>		<u>Allgemein</u>	
Anschaffungskosten	250.000 €	Anschaffungskosten	50.000 €	Anschaffungskosten	20.000 €	Anschaffungskosten	50.000 €
Energieverbrauch	2 kW	Energieverbrauch	4,5 kW	Energieverbrauch	0,25 kWh/km	Energieverbrauch	4,5 kW
Mittlere Geschwindigkeit	12 km/h	Mittlere Geschwindigkeit	5 km/h	Mittlere Geschwindigkeit	54 km/h	Mittlere Geschwindigkeit	5 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²	Beschleunigung	0,5 m/s ²	Beschleunigung	5 m/s ²	Beschleunigung	0,5 m/s ²
<u>Ladung</u>				<u>Ladung</u>			
Ladegröße	16			Ladegröße	1		
Beladung des Zubringers	60 s			Beladung des Zubringers	30 s		
Manuelle Bedienung (Ja/Nein)	Nein	Manuelle Bedienung (Ja/Nein)	Nein	Manuelle Bedienung (Ja/Nein)	Nein	Manuelle Bedienung (Ja/Nein)	Nein
<u>Aufbauten</u>		<u>Aufbauten</u>		<u>Aufbauten</u>		<u>Aufbauten</u>	
Typ	Anz./Fahrz.	Kosten		Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	
Schraubautomat			1 10.000 €	Schraubautomat			1 10.000 €
Gelenkarmroboter			1 15.000 €	Gelenkarmroboter			1 15.000 €
RTK/LiDar			1 10.000 €	RTK/LiDar			1 10.000 €
Summe		- €	35.000 €	Summe		- €	35.000 €
Gesamtkosten		250.000 €	85.000 €	Gesamtkosten		20.000 €	85.000 €
Geschätzte Wegstrecke der Handhabung	1 m	Geschätzte Wegstrecke der Handhabung	0,5 m	Geschätzte Wegstrecke der Handhabung	5 m	Geschätzte Wegstrecke der Handhabung	0,5 m

Taktzeitabschätzung

	Zeit
Fertigungsverfahren	Schrauben
Anzahl der Fügevorgänge	2 s
Bewegung des Werkzeugs pro Vorgang	4
Gesamt	5 s
	<hr/>
	28
Geschwindigkeit der Platzierung (Handhabung)	0,25 m/s

Rahmen der Pylone

Konzept I

40t-LKW		15t-Hydraulikbagger		7,5t-LKW		Sonderfahrzeug auf Raupenfahrwerk			
40t-LKW		15t-Bagger		7,5-LKW (z.B. Isuzu N-Series, auch 8,55t verfügbar)		Sonderfahrzeug auf Raupenfahrwerk			
Allgemein		Allgemein		Allgemein		Allgemein			
Anschaffungskosten	85.000 €	Anschaffungskosten	150.000 €	Anschaffungskosten	60.000 €	Anschaffungskosten	60.000 €		
Energieverbrauch	10 l/h	Energieverbrauch	10 l/h	Energieverbrauch	7 l/h	Energieverbrauch	10 l/h		
Mittlere Geschwindigkeit	20 km/h	Mittlere Geschwindigkeit	6 km/h	Mittlere Geschwindigkeit	20 km/h	Mittlere Geschwindigkeit	12 km/h		
Beschleunigung	0,5 m/s ²	Beschleunigung	0,5 m/s ²	Beschleunigung	0,5 m/s ²	Beschleunigung	0,5 m/s ²		
Ladung		Ladung		Ladung		Ladung			
Ladegröße	500	Ladegröße	400	Ladegröße	200	Ladegröße	200		
Beladung der Maschine	180 s	Beladung der Maschine	180 s	Beladung der Maschine	120 s	Beladung der Maschine	180 s		
Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Ja		Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Ja		Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Ja		Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Ja			
Aufbauten		Aufbauten		Aufbauten		Aufbauten			
Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	
Portalroboter	1	15.000 €	Vibrationsramme	1	30.000 €	Portalroboter	1	5.000 €	
Vibrationsramme	1	30.000 €	Strukturkosten	1	10.000 €	Vibrationsramme	1	30.000 €	
Strukturkosten	1	15.000 €	Autonomiekit	1	100.000 €	Strukturkosten	1	5.000 €	
Autonomiekit	1	100.000 €	Mäkler/Führung	1	20.000 €	Autonomiekit	1	100.000 €	
Mäkler/Führung	1	20.000 €				Mäkler/Führung	1	20.000 €	
Summe		180.000 €	Summe		140.000 €	Summe		160.000 €	
Gesamtkosten		265.000 €	Gesamtkosten		290.000 €	Gesamtkosten		220.000 €	
Geschätzte mittlere Wegstrecke der Handhabung zum Nachladen		5 m		Geschätzte mittlere Wegstrecke der Handhabung zum Nachladen		3 m		Geschätzte mittlere Wegstrecke der Handhabung zum Nachladen	

Konzept II

Autonomer eStapler + 7,5t-LKW		7,5t-LKW (z.B. Isuzu N-Series, Mitsubishi Fuso)		Manueller eStapler + 7,5t-LKW		7,5t-LKW (z.B. Isuzu N-Series, Mitsubishi Fuso)		
Autonomer Elektro stapler		7,5t-LKW (z.B. Isuzu N-Series, Mitsubishi Fuso)		Manueller Elektro stapler		7,5t-LKW (z.B. Isuzu N-Series, Mitsubishi Fuso)		
Allgemein		Allgemein		Allgemein		Allgemein		
Anschaffungskosten	30.000 €	Anschaffungskosten	60.000 €	Anschaffungskosten	30.000 €	Anschaffungskosten	60.000 €	
Energieverbrauch	0,3 kWh/km	Energieverbrauch	7 l/h	Energieverbrauch	0,3 kWh/km	Energieverbrauch	7 l/h	
Mittlere Geschwindigkeit	12 km/h	Mittlere Geschwindigkeit	20 km/h	Mittlere Geschwindigkeit	12 km/h	Mittlere Geschwindigkeit	20 km/h	
Beschleunigung	0,5 m/s ²	Beschleunigung	0,5 m/s ²	Beschleunigung	0,5 m/s ²	Beschleunigung	0,5 m/s ²	
Ladung		Ladung		Ladung		Ladung		
Ladegröße	200	Ladegröße	200	Ladegröße	200	Ladegröße	200	
Beladung des Zubringers	120 s	Beladung des Zubringers	120 s	Beladung des Zubringers	120 s	Beladung des Zubringers	120 s	
Beladung der Maschine	120 s	Beladung der Maschine	120 s	Beladung der Maschine	120 s	Beladung der Maschine	120 s	
Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Nein		Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Ja		Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Ja		Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Ja		
Aufbauten		Aufbauten		Aufbauten		Aufbauten		
Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	Typ	Anz./Fahrz.	Kosten	Typ	Anz./Fahrz.	Kosten
Autonomie Kit	1	100.000 €	Portalroboter	1	5.000 €	Portalroboter	1	5.000 €
			Vibrationsramme	1	30.000 €	Vibrationsramme	1	30.000 €
			Strukturkosten	1	5.000 €	Strukturkosten	1	5.000 €
			Autonomiekit	1	100.000 €	Autonomiekit	1	100.000 €
			Mäkler/Führung	1	20.000 €	Mäkler/Führung	1	20.000 €
			Verstärkung für Fahrzeug	1	10.000 €	Verstärkung für Fahrzeug	1	10.000 €
Summe		100.000 €	Summe		170.000 €	Summe		170.000 €
Gesamtkosten		130.000 €	Gesamtkosten		230.000 €	Gesamtkosten		230.000 €
Geschätzte Wegstrecke der Handhabung zum Nachladen		3 m		Geschätzte Wegstrecke der Handhabung zum Nachladen		3 m		

Rammen der Pylone

Konzept II

Manueller eStapler + 15t-Bagger

Manueller Elektrostapler

Allgemein

Anschaffungskosten	50.000 €
Energieverbrauch	0,4 kWh/km
Mittlere Geschwindigkeit	12 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²

Ladung

Ladegröße	400
Beladung des Zubringers	120 s
Beladung der Maschine	120 s

Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Ja

Aufbauten

Typ	Anz./Fahrz.	Kosten
Vibrationsramme	1	30.000 €
Strukturkosten	1	10.000 €
Autonomiekit	1	100.000 €
Summe	-	€
Gesamtkosten		50.000 €

15t-Bagger

Allgemein

Anschaffungskosten	150.000 €
Energieverbrauch	10 l/h
Mittlere Geschwindigkeit	6 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²

Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Ja

Aufbauten

Typ	Anz./Fahrz.	Kosten
Vibrationsramme	1	30.000 €
Strukturkosten	1	10.000 €
Autonomiekit	1	100.000 €
Summe		140.000 €
Gesamtkosten		290.000 €

Geschätzte Wegstrecke der Handhabung zum Nachladen 3 m

Manueller eStapler + Sonderfahrzeug auf Raupenfahrwerk

Manueller Elektrostapler

Allgemein

Anschaffungskosten	30.000 €
Energieverbrauch	0,3 kWh/km
Mittlere Geschwindigkeit	12 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²

Ladung

Ladegröße	200
Beladung des Zubringers	120 s
Beladung der Maschine	120 s

Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Ja

Aufbauten

Typ	Anz./Fahrz.	Kosten
HydraulikPowerPack	1	30.000 €
Vibrationsramme	1	30.000 €
Strukturkosten	1	20.000 €
Autonomiekit	1	80.000 €
Handhabeinrichtung	1	10.000 €
Summe	-	€
Gesamtkosten		30.000 €

Sonderfahrzeug auf Raupenfahrwerk

Allgemein

Anschaffungskosten	60.000 €
Energieverbrauch	10 l/h
Mittlere Geschwindigkeit	12 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²

Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Ja

Aufbauten

Typ	Anz./Fahrz.	Kosten
HydraulikPowerPack	1	30.000 €
Vibrationsramme	1	30.000 €
Strukturkosten	1	20.000 €
Autonomiekit	1	80.000 €
Handhabeinrichtung	1	10.000 €
Summe		170.000 €
Gesamtkosten		230.000 €

Geschätzte mittlere Wegstrecke der Handhabung zum Nachladen 3 m

Konzept III

Mittelgroßes UGV + 15t-Bagger

Mittelgroßes UGV

Allgemein

Anschaffungskosten	70.000 €
Energieverbrauch	0,09 kWh/km
Mittlere Geschwindigkeit	12 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²

Ladung

Ladegröße	40
Beladung des Zubringers	30 s

Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Nein

Aufbauten

Typ	Anz./Fahrz.	Kosten
RTK/LiDar	1	5.000 €
Summe		5.000 €
Gesamtkosten		75.000 €

15t-Bagger

Allgemein

Anschaffungskosten	150.000 €
Energieverbrauch	10 l/h
Mittlere Geschwindigkeit	6 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²

Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Nein

Aufbauten

Typ	Anz./Fahrz.	Kosten
Vibrationsramme	1	30.000 €
Strukturkosten	1	10.000 €
Autonomiekit	1	100.000 €
Summe		140.000 €
Gesamtkosten		290.000 €

Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 3 m

Mittelgroßes UGV + Solar Pile Driver

Mittelgroßes UGV

Allgemein

Anschaffungskosten	70.000 €
Energieverbrauch	0,09 kWh/km
Mittlere Geschwindigkeit	12 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²

Ladung

Ladegröße	12
Beladung des Zubringers	30 s

Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Nein

Aufbauten

Typ	Anz./Fahrz.	Kosten
RTK/LiDar	1	5.000 €
Summe		5.000 €
Gesamtkosten		75.000 €

Solar Pile Driver (z.B. Vermeer)

Allgemein

Anschaffungskosten	300.000 €
Energieverbrauch	8 l/h
Mittlere Geschwindigkeit	6 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²

Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Nein

Aufbauten

Typ	Anz./Fahrz.	Kosten
Summe		- €
Gesamtkosten		300.000 €

Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 2 m

Rammen der Pylone

Konzept IV

Flugdrohne + 15t-Bagger

Flugdrohne (DJI FlyCart 30)

Allgemein

Anschaffungskosten	20.000 €
Energieverbrauch	0,25 kWh/km
Mittlere Geschwindigkeit	54 km/h
Beschleunigung	5 m/s ²

Ladung

Ladegröße	1
Beladung des Zubringers	30 s

Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Nein

Aufbauten

Typ	Anz./Fahrz.	Kosten
Summe	-	€
Gesamtkosten		20.000 €

Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 5 m

15t-Bagger

Allgemein

Anschaffungskosten	150.000 €
Energieverbrauch	10 l/h
Mittlere Geschwindigkeit	6 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²

Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Nein

Aufbauten

Typ	Anz./Fahrz.	Kosten
Vibrationsramme	1	30.000 €
Strukturkosten	1	10.000 €
Autonomiekit	1	100.000 €
Summe		140.000 €
Gesamtkosten		290.000 €

Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 1,5 m

Mittelgroßes UGV + 15t-Bagger

Mittelgroßes UGV

Allgemein

Anschaffungskosten	70.000 €
Energieverbrauch	0,09 kWh/km
Mittlere Geschwindigkeit	12 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²

Ladung

Ladegröße	40
Beladung des Zubringers	30 s

Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Nein

Aufbauten

Typ	Anz./Fahrz.	Kosten
Portalroboter	1	10.000 €
RTK/LiDar	1	5.000 €
Summe		15.000 €
Gesamtkosten		85.000 €

Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 5 m

15t-Bagger

Allgemein

Anschaffungskosten	150.000 €
Energieverbrauch	10 l/h
Mittlere Geschwindigkeit	6 km/h
Beschleunigung	0,5 m/s ²

Manuelle Bedienung (Ja/Nein) Nein

Aufbauten

Typ	Anz./Fahrz.	Kosten
Vibrationsramme	1	30.000 €
Strukturkosten	1	10.000 €
Autonomiekit	1	100.000 €
Summe		140.000 €
Gesamtkosten		290.000 €

Geschätzte Wegstrecke der Handhabung 1,5 m

Taktzeitabschätzung

Zeit

Fertigungsverfahren	Vibrationsrammen	60 s
Anzahl der Fügevorgänge		1
Bewegung des Werkzeugs pro Vorgang		10 s
Gesamt		70

Geschwindigkeit des Nachladens 0,25 m/s

A.7. Anlagen

Auflistung der Berechnungsdateien zu Abschnitt 4.4.5

Rahmen der Pylonen (Ordner: PileDriving)	
Ergebnisse	PileDriving_Berechnungsergebnisse.xlsx
Konzept I	#PD1_7,5t-LKW.xlsx #PD1_15t-Hydraulikbagger.xlsx #PD1_40t-LKW.xlsx #PD1_Sonderfahrzeug_auf_Raupenfahrwerk.xlsx
Konzept II	#PD2_Autonomer_eStapler+7,5t-LKW.xlsx #PD2_Manueller_eStapler+7,5t-LKW.xlsx #PD2_Manueller_eStapler+15t-Bagger.xlsx #PD2_Manueller_eStapler+Sonderfahrzeug_auf_Raupenfahrwerk.xlsx
Konzept III	#PD3_Mittelgroßes_UGV+15t-Bagger.xlsx #PD3_Mittelgroßes_UGV+SolarPileDriver.xlsx
Konzept IV	#PD4_Flugdrohne+15t-Bagger.xlsx #PD4_Mittelgroßes_UGV+15t-Bagger.xlsx
Montage der Konzentratoren (Ordner: KonzentrationMontage)	
Ergebnisse	KonzentrationMontage_Berechnungsergebnisse.xlsx
Konzept I	#1_7,5t-eLKW.xlsx #1_7,5t-LKW.xlsx #1_40t-LKW.xlsx #1_Sonderbau_UGV(groß).xlsx
Konzept II	#2_Autonomer_eStapler+7,5t-eLKW.xlsx #2_Autonomer_eStapler+7,5t-LKW.xlsx #2_eGreifstapler+40t-LKW.xlsx #2_Greifstapler+40t-LKW.xlsx #2_Kleines_UGV(fast)+Mobiler_Manipulator.xlsx

Fortsetzung...

A. Anhang

	#2_Kleines_UGV(hohe_elekt_Reichweite)+Mobiler_Manipulator.xlsx
	#2_Kleines_UGV+Mobiler_Manipulator.xlsx
	#2_Manueller_eStapler+7,5t-LKW.xlsx
Konzept III	#3_Großes_UGV+Mobiler_Manipulator.xlsx
	#3_Kleines_UGV(Quasistetigf.)+Mobiler_Manipulator.xlsx
	#3_Mittelgroßes_UGV+Mobiler_Manipulator.xlsx
Konzept IV	#4_Flugdrohne+Mobiler_Manipulator.xlsx
	#4_Großes_UGV+Mobiler_Manipulator.xlsx
	#4_Kleines_UGV+Mobiler_Manipulator.xlsx
	#4_Mittelgroßes_UGV+Mobiler_Manipulator.xlsx
	#4_Sonderbau_UGV(verringerte_Ablagezeit)+Mobiler_Manipulator.xlsx
