

# **Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo) Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen**

**DMT GmbH & Co. KG**

**IAV GmbH Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr**

**TÜV Nord Mobilität**

Hamburg, 19.02.2025

(N. Hentrich)

(M. Arnold)

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 2 von 97
		Stand: 19.02.2025

**Impressum:**

Auftraggeberin: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)  
Eschenstraße 55  
31224 Peine

Telefon: 05171 43 0  
Fax: 05171 43-1218  
E-Mail: [dialog@bge.de](mailto:dialog@bge.de)  
Internet: [www.bge.de](http://www.bge.de)

Ersteller: M. Arnold<sup>1</sup>, S. Coninx<sup>1</sup>, H. Ehrich<sup>2</sup>, J. Lakermann<sup>2</sup>, R. Borsdorf<sup>3</sup>, M. Robert<sup>3</sup>

<sup>1</sup> DMT GmbH & Co. KG  
Friedrich-Ebert-Damm 145  
22047 Hamburg  
Telefon: +49 (0)40 8557-2572  
Internet: [www.dmt-group.com](http://www.dmt-group.com)

<sup>2</sup> TÜV Nord Mobilität GmbH & Co. KG  
Institut für Fahrzeugtechnik und Mobilität (IFM)  
Schönscheidtstraße 28  
45307 Essen

<sup>3</sup> IAV GmbH Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr  
Carnotstraße 1  
10587 Berlin  
Telefon: +49 (0)30 397-80  
Internet: [www.iav.com](http://www.iav.com)

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden im Auftrag der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren. Die hierin geäußerten Meinungen müssen nicht der Meinung der Auftraggeberin entsprechen.

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 3 von 97
		Stand: 19.02.2025

## 0. Abgrenzung des Auftrags der DMT durch BGE

Die Erstellung des nachfolgenden Berichts „Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen“ wurde von der BGE an DMT GmbH & Co. KG im Rahmen der ÜsiKo Phase 2 beauftragt (ÜsiKo = „Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik“). Die ÜsiKo wird – initiiert von der BGE als verantwortungsvolle Vorhabenträgerin – unabhängig von der jederzeit gegebenen behördlichen Überwachung, als selbstständige Überprüfung durch externe Fachgutachter und Sachverständige durchgeführt. Der Planfeststellungsbeschluss Konrad ist bestandskräftig. Er selbst ist kein Gegenstand der Überprüfung i. S. d. ÜsiKo.

Inhalte und Ergebnisse des nachfolgenden Berichts liegen allein in der Verantwortung des jeweiligen Verfassers, der seinen Auftrag selbstständig und frei von Weisungen erfüllt hat. Die Ausführungen in diesem Kapitel erfolgen von Seiten der BGE und dienen ausschließlich der Einordnung der Bearbeitung des Auftrags für ÜsiKo Phase 2.

Die ÜsiKo umfasst bislang folgende zwei Phasen: Die Phase 1 (2017-2020) diente der Ermittlung des Überprüfungsbedarfs. Hier wurde fachgutachterlich untersucht, ob in Bezug auf die Sicherheitsanalysen für das Endlager Konrad ein allgemeiner Fortschritt im Stand von Wissenschaft und Technik eingetreten ist. Soweit dies der Fall ist, wurde dieser Fortschritt als sogenanntes Delta formuliert. Zum überwiegenden Teil wurde bereits in Phase 1 festgestellt, dass der konstatierte Fortschritt keine Relevanz in Bezug auf die Sicherheit des Endlagers Konrad aufweist. Konnte eine Relevanz in Bezug auf die Sicherheit des Endlagers Konrad – in vereinzelt Fällen – in Phase 1 nicht von vornherein ausgeschlossen werden, wurde insoweit ein weiterer Betrachtungsbedarf für Phase 2 ermittelt (sog. sicherheitsrelevante Deltas).

Die Feststellung eines sogenannten sicherheitsrelevanten Deltas in Phase 1 allein lässt keine Schlussfolgerungen in Bezug auf die Sicherheit des Endlagers Konrad zu. Es wird lediglich festgestellt, dass sich der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik in Bezug auf die Anforderungen an ein heute neu zu genehmigendes Endlager verändert hat und eine sicherheitstechnische Relevanz nicht von vornherein verneint werden kann. Die ÜsiKo sieht für diesen Fall vor, dass eine weitergehende fachgutachterliche Betrachtung in Phase 2 (Aktualisierung von Sicherheitsanalysen) erfolgt.

Bei der Aktualisierung von Sicherheitsanalysen (Phase 2 der ÜsiKo) setzen sich die Fachgutachter mit den konkreten Ausprägungen eines Fortschritts im Stand von Wissenschaft und Technik mit Bezug zu den sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad (sog. Sicherheitsrelevanz) auseinander. Im Rahmen der Bearbeitung in Phase 2 werden z.B. neue Modellrechnungen vorgenommen. Sodann wird untersucht, ob eine Relevanz dieser Ergebnisse für die Sicherheitsanforderungen des Endlagers Konrad nach Phase 2 ausgeschlossen werden kann (1.) oder ob die Sicherheitsrelevanz weiter besteht (2.).

1. Soweit fachgutachterlich festgestellt wird, dass sich die in Phase 1 identifizierte potenzielle Sicherheitsrelevanz nach dem Ergebnis der Phase 2 nicht bestätigt, sind Folgerungen in Bezug auf die Sicherheit des Endlagers Konrad ausgeschlossen. In diesem Fall wird das Delta bereits mit der Aktualisierung der Sicherheitsanalysen geschlossen. Für den Fall, dass die Fachgutachter hier gleichwohl Empfehlungen abgeben, bedeutet

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 4 von 97
		Stand: 19.02.2025

dies nicht, dass ihre Umsetzung im Hinblick auf die Sicherheit des Endlagers geboten ist. In diesen Fällen wird die BGE in Abstimmung mit den Behörden vielmehr im Einzelfall bewerten, ob und wenn ja, in welcher Weise eine Realisierung erfolgt, um ggf. einen Beitrag zur überobligatorischen Optimierung der Sicherheit des Endlagers zu leisten.

2. Soweit die Sicherheitsrelevanz eines Deltas für das Endlager Konrad nach der fachgutachterlichen Untersuchung nicht ausgeschlossen werden kann, wird die BGE in Abstimmung mit den Behörden unter Einbeziehung etwaiger Empfehlungen der Gutachter über etwaige Maßnahmen beraten und diese – soweit erforderlich – anschließend umsetzen.

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 5 von 97
		Stand: 19.02.2025

## Kurzfassung

Verfasser: M. Arnold<sup>1</sup>, S. Coninx<sup>1</sup>, H. Ehrich<sup>2</sup>, J. Lakermann<sup>2</sup>, R. Borsdorf<sup>3</sup>, M. Robert<sup>3</sup>

**Titel:** Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo) Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen unter Tage

**Stand:** 19.02.2025

In diesem Abschlussbericht wird bewertet, ob durch den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen oder autonomen Systemen ein signifikanter Sicherheitsgewinn in Bezug auf die Vermeidung von Kollisionen im Einlagerungsbetrieb des Endlagers Konrad erzielt werden kann. Im PFB [1] wurde festgestellt, dass mit den dort beschriebenen Schutzmaßnahmen eine sichere Einlagerung gewährleistet ist und somit ein ausreichendes Sicherheitsniveau gegeben ist. In dem vorliegenden Bericht wird geprüft, ob ein Einsatz von Fahrerassistenzsystemen bzw. von autonom betriebenen Fahrzeugen über die schon bestehenden Schutzmaßnahmen zur sicheren Einlagerung hinaus zu einem signifikanten Sicherheitsgewinn führt. Aufbauend auf den Ergebnissen der Phase 1 der Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo) werden verfügbare Fahrerassistenzsysteme oder autonome Systeme erst hinsichtlich ihrer Eignung und dann bezüglich ihres Sicherheitsgewinns bewertet. Grundlage der Bewertung hierbei sind die bereits technisch vorgesehenen/verwendeten Systeme zum Betrieb des Endlagers Konrad. Zusätzlich wird betrachtet, ob die Einfahrt eines Fahrzeuges bzw. eines beladenen Transportwagens in einen gesperrten Streckenabschnitt (Überfahren einer roten Lichtsignalanlage) ausreichend vermieden wird oder ob zusätzliche, ergänzende Maßnahmen sinnvoll sind.

Die Ergebnisse der Betrachtungen zeigen, dass das planfestgestellte Sicherheitsniveau den aktuellen Anforderungen entspricht. Es konnten keine Systeme identifiziert werden, die gegenüber dem planfestgestellten Sicherheitsniveau einen signifikanten Sicherheitsgewinn liefern. Dennoch konnten mehrere Systeme identifiziert werden, die einen Sicherheitsgewinn bei einem verhältnismäßigen Aufwand für die Umsetzung/Nachrüstung liefern können. Die beiden empfehlenswertesten Systeme, die eine Optimierungsmaßnahme darstellen können, sind:

1. Zusätzliche, mit den Lichtsignalanlagen gekoppelte Schrankenanlagen an den Knotenpunkten, die die Einfahrt in gesperrte Streckenabschnitte verhindern.
2. Einsatz von Lidarsensoren zur sensorbasierten Umfelderkassung (informierendes bzw. warnendes System).

Beides sind passive Systeme (ohne Eingriff in die Fahrzeugsysteme) und könnten nachgerüstet werden.

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 6 von 97
		Stand: 19.02.2025

Autonome Systeme und andere potentiell geeignete aktive Fahrerassistenzsysteme liefern keinen ausreichenden zusätzlichen Sicherheitsgewinn, sodass der Einsatz dieser hier nicht empfohlen wird.

## Inhaltsverzeichnis

0.	Abgrenzung des Auftrags der DMT durch BGE.....	3
	Kurzfassung .....	5
	Inhaltsverzeichnis.....	7
	Anhangsverzeichnis.....	10
	Abbildungsverzeichnis.....	11
	Tabellenverzeichnis.....	12
	Abkürzungsverzeichnis .....	13
1.	Einleitung und Aufgabenstellung .....	14
2.	Darstellung des sicherheitsrelevanten Deltas .....	15
3.	Allgemeine Randbedingungen .....	16
4.	Sicherheitstechnische Systeme zur Verhinderung von Kollisionen unter Tage bei der Errichtung und während des Betriebs des Endlagers Konrad gemäß PFB .....	17
4.1	Betriebszustände .....	18
4.1.1	Einlagerungsbetrieb.....	19
4.1.2	Einlagerungsfreier Betrieb .....	19
4.1.3	Anomaler Betrieb.....	19
4.2	Verkehrslenkung unter Tage.....	19
4.2.1	Einlagerungsbetrieb mit Verkehrlenkung unter Tage .....	21
4.2.2	Einlagerungsfreier Betrieb .....	21
4.3	Fahrzeuge .....	21
4.3.1	Transportwagen.....	21
4.3.2	Stapelfahrzeug .....	22
4.4	Schutzmaßnahmen .....	22
5.	Zusätzliche technische Systeme zur Verhinderung von Kollisionen unter Tage bei der Errichtung und für den Betrieb des Endlagers Konrad im Vergleich zum PFB.....	28
5.1	Schutzmaßnahmen bei der Errichtung des Endlagers .....	28
5.2	Zusätzliche Schutzmaßnahmen für den Betrieb des Endlagers .....	29
6.	Vorgehensweise zur Bewertung von Fahrerassistenzsystemen und autonomen Systemen .....	30
7.	Beschreibung von Fahrerassistenzsystemen und autonomen Fahrzeugen mit Bezug zu den Projektzielen.....	32
7.1	Grundlegende Einordnung von Fahrerassistenzsystemen und autonomen Systemen .....	32
7.2	Fahrerassistenzsysteme bei mobilen Arbeitsmaschinen und Bergbaufahrzeugen .....	33
7.3	Autonome Fahrzeugkonzepte.....	34
8.	Systemübersicht .....	35
8.1	Einordnung von Fahrerassistenzsystemen mit Bezug zu den Projektzielen...	35
8.1.1	Systeme zur Stabilisierung der Fahrzeugführung .....	35
8.1.2	Kamerabasierte Umfeldvisualisierung.....	36

8.1.3	Fahreraufmerksamkeits- und Fahrerzustandserfassung .....	36
8.1.4	Kollisionsmeldesysteme .....	37
8.1.5	Funkbasierte Nahbereichskommunikation .....	37
8.1.6	Fahrzeuglokalisierung.....	38
8.1.7	Positionierhilfen .....	38
8.1.8	Sensorbasierte Umfelderkennung zur Kollisionsvermeidung.....	39
8.1.9	Kamerabasierte Erfassung von Lichtsignalanlagen .....	39
8.1.10	Fahrerassistenzsysteme zur Fahrzeugführung .....	40
8.1.11	Teleoperierte Systeme.....	40
8.2	Darstellung geeigneter Systeme für den betrachteten Anwendungsfall .....	41
8.2.1	Kamerasysteme für den Transportwagen .....	41
8.2.2	Fahrerbeobachtungskameras .....	42
8.2.3	Übertragung von LSA-Daten per Nahbereichskommunikation .....	42
8.2.4	Übertragung von Fahrzeuginformationen per Nahbereichskommunikation ....	43
8.2.5	Optische Markierungen als Positionierhilfe .....	43
8.2.6	Hinderniserkennung zur Kollisionsvermeidung .....	44
8.2.7	Automatisierte Quer- und Längsführung .....	44
8.2.8	Teleoperierter Betrieb .....	45
8.3	Zusammenfassung Systeme .....	46
9.	Vermeidung der Einfahrt in gesperrte Streckenabschnitte.....	46
9.1	Vermeiden von Rotlicht-Verstößen im Vorfeld .....	48
9.2	Aktives Hindern an einer Weiterfahrt .....	48
9.3	Bewertung .....	49
10.	Bewertung des Sicherheitsgewinns .....	50
11.	Methodikbeschreibung zur Einstufung des Sicherheitsgewinns.....	51
12.	Bewertung des Sicherheitsgewinns für die geeigneten Systeme .....	52
12.1	Kamerasysteme.....	55
12.1.1	Fahrerassistenzsystem zur Umfeldvisualisierung durch Fahrzeugkameras ...	55
12.1.2	Fahrerassistenzsystem zur Umfeldvisualisierung durch fahrzeugexterne Kameras .....	58
12.2	Fahrerüberwachung.....	62
12.2.1	Fahrerassistenzsystem zur Fahrerüberwachung durch Fahrerbeobachtungskamera .....	62
12.3	Übertragung von LSA-Daten per Nahbereichskommunikation .....	64
12.3.1	Fahrerassistenzsystem zum Nahbereichs-Datenaustausch per Funk durch Meldung von Lichtsignalanlagen.....	64
12.4	Übertragung von Fahrzeuginformationen per Nahbereichskommunikation ....	69
12.4.1	Fahrerassistenzsystem zum Nahbereichsdatenaustausch durch Übertragung von Fahrzeuginformationen per Nahbereichskommunikation.....	69
12.5	Optische Markierungen als Positionierhilfe .....	72
12.5.1	Fahrerassistenzsystem zur Navigations- und Positionierhilfe über Linien- oder Kreuzlaser .....	72
12.5.2	Fahrerassistenzsystem zur Navigations- und Positionierhilfe über codierte Marker .....	75
12.6	Hinderniserkennung zur Kollisionsvermeidung .....	78



<b>DMT</b>	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 9 von 97
		Stand: 19.02.2025

12.6.1	Fahrerassistenzsystem zur sensorbasierten Umfelderkennung durch Lidarsensoren.....	78
12.7	Automatisierte Querführung- und Längsführung .....	82
12.7.1	Fahrerassistenzsystem zur automatisierten Fahrzeugführung durch kartenbasierte Querführung- und Längsführung .....	82
12.8	Teleoperierter Betrieb .....	85
12.8.1	Teleoperiertes System zur Fernsteuerung der Systeme durch Übertragung von Bild- und Statusdaten nach über Tage bzw. von Steuerbefehlen nach unter Tage .....	85
13.	Ergebnisse und Empfehlungen .....	86
13.1	Hinweis: Erweiterung der Lichtsignalanlagen (LSA) an den Knotenpunkten mit Schrankenanlagen.....	88
13.2	Hinweis: Fahrerassistenzsystem zum Nahbereichsdatenaustausch .....	88
13.3	Hinweis: Integration von Lidarsensoren in den Transportwagen zur sensorbasierten Umfelderkennung zur Warnung/Information vor Kollisionen mit dem Stoß oder Hindernissen .....	89
14.	Literaturverzeichnis.....	91
15.	Anhang.....	96

Gesamtseitenzahl: 97

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 10 von 97
		Stand: 19.02.2025

## Anhangsverzeichnis

Anhang 1:	Liste relevanter Unterlagen für das Endlager Konrad.....	96
-----------	--	----

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 11 von 97
		Stand: 19.02.2025

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Darstellung des Einlagerungsvorgangs.....	18
Abbildung 2:	Schematische Darstellung der Einlagerungstransportstrecke .....	20
Abbildung 3:	Schematische Darstellung der Bewertung von Fahrerassistenz- bzw. autonomen Systemen.....	31
Abbildung 4:	Level der Fahrzeugautomatisierung nach SAE .....	32
Abbildung 5:	Aktuell geplantes System der LSA ohne Nahbereichskommunikation zur Erfassung eines Rotlicht-Verstoßes mittels Detektionsfeld.....	42
Abbildung 6:	Schematische Darstellung LSA.....	47
Abbildung 7:	Hydraulisch absenkbarer Poller mit LED Signalen im oberen Teil .....	49

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vorhandene Schutzmaßnahmen .....	23
Tabelle 2:	Komponenten des Kollisionswarnsystems .....	29
Tabelle 3:	Geeignete und ungeeignete Systeme .....	46
Tabelle 4:	Betrachtete anlageninterne Ereignisse aus der Störfallanalyse .....	53
Tabelle 5:	Zuordnung der Störfälle mit und ohne Brandereignis gemäß Störfallanalyse .....	54
Tabelle 6:	Bewertung: Umfeldvisualisierung durch Fahrzeugkamas.....	56
Tabelle 7:	Bewertung: Umfeldvisualisierung durch fahrzeugexterne Kamas .....	59
Tabelle 8:	Bewertung: Fahrerüberwachung durch Fahrerbeobachtungskamera.....	62
Tabelle 9:	Bewertung: Nahbereichsdatenaustausch per Funk durch Meldung von Lichtsignalanlagen.....	65
Tabelle 10:	Bewertung: Nahbereichsdatenaustausch durch Übertragung von Fahrzeuginformationen per Nahbereichskommunikation .....	70
Tabelle 11:	Bewertung: Navigations- und Positionierhilfe über Linien- oder Kreuzlaser .....	72
Tabelle 12:	Bewertung: Navigations- und Positionierhilfe über codierte Marker .....	75
Tabelle 13:	Bewertung: Sensorbasierte Umfelderkennung Lidarsensoren .....	78
Tabelle 14:	Bewertung: Automatisierte Fahrzeugführung durch kartenbasierte Quer- und Längsführung.....	82

## Abkürzungsverzeichnis

<b>ABS</b>	Anti-Blockier-System
<b>AGV</b>	Automated Guided Vehicle (dt.: automatisiert geführte Fahrzeuge)
<b>AR</b>	Augmented Reality
<b>BaSt</b>	Bundesamt für Straßenverkehr
<b>BGE</b>	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
<b>ELK</b>	Einlagerungskammer
<b>ESK</b>	Entsorgungskommission
<b>ESP</b>	Elektronisches Stabilitätsprogramm
<b>ETS</b>	Einlagerungstransportstrecke
<b>EU</b>	Erläuternde Unterlage (siehe auch Anhang A)
<b>LKW</b>	Lastkraftwagen
<b>LSA</b>	Lichtsignalanlage
<b>NMU</b>	Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klimaschutz
<b>PFB</b>	Planfeststellungsbeschluss
<b>PFV</b>	Planfeststellungsverfahren
<b>PKW</b>	Personenkraftwagen
<b>PTB</b>	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
<b>QR</b>	Quick Response
<b>RFID</b>	Radio-Frequency Identification
<b>SAE</b>	Society of Automotive Engineers
<b>ÜsiKo</b>	Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik
<b>TW</b>	Transportwagen
<b>VluT</b>	Verkehrslenkung unter Tage
<b>WKP</b>	Wiederkehrende Prüfung
<b>WMS</b>	Wegemesssystem
<b>WPAN</b>	Wireless Personell Area Network

## 1. Einleitung und Aufgabenstellung

Das zukünftige Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle Konrad liegt im südöstlichen Niedersachsen auf dem Gebiet der Stadt Salzgitter. Die Endlager Konrad hat zwei Schächte Konrad 1 und Konrad 2 mit Tiefen von 1.200 bzw. 1.000 Metern.

Der untertägige Bereich des Endlagers Endlager wird als Erweiterung des Grubengebäudes eines bestehenden ehemaligen Eisenerzbergwerks errichtet. Das Eisenerzvorkommen in einer Teufe von 800 bis 1.300 Metern hat eine Mächtigkeit von 12 bis 18 Metern. In neu aufgefahrenen Einlagerungsbereichen sollen bis zu 303.000 Kubikmeter radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung endgelagert werden.

Im Jahr 1982 stellte die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) als damals für die Endlagerung zuständige Behörde einen Antrag auf Einleitung eines Planfeststellungsverfahrens (PFV).

Das PFV für Konrad war ein atomrechtliches Genehmigungsverfahren, das sowohl eine Umweltverträglichkeitsprüfung als auch eine Öffentlichkeitsbeteiligung beinhaltete. Bis zum Ende des PFV wurden neue Entwicklungen des Standes von Wissenschaft und Technik sowie des Regelwerkes (insbesondere die Neufassung der Strahlenschutzverordnung im Jahr 2001) regelmäßig berücksichtigt. Darauf basierend hat die Genehmigungsbehörde unter Beteiligung von Sachverständigen im Jahr 2002 im Planfeststellungsbeschluss (PFB) [1] festgestellt, dass die erforderliche Vorsorge gegen Schäden aus der Endlagerung radioaktiver Abfälle gewährleistet ist. Anhaltspunkte, die Zweifel an der Gültigkeit dieser Feststellung begründen, liegen der BGE nicht vor.

Die Verantwortung für das Endlager Konrad lag bis zum 24. April 2017 beim Bundesamt für Strahlenschutz. Auf Grundlage des "Gesetz zur Neuordnung der Organisationsstruktur im Bereich der Endlagerung", das am 30. Juli 2016 in Kraft trat, auf die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) übertragen worden, und dem Bescheid des Bundes v. 24. April 2017 wurde die Aufgabenwahrnehmung der Planung, Errichtung und Betrieb von Endlagern für radioaktive Abfälle, so auch für das Endlager Konrad, auf die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) übertragen.

Als verantwortungsvolles Unternehmen führt die BGE das bereits vom vorhergehenden Betreiber, dem Bundesamt für Strahlenschutz, begonnene freiwillige Überprüfungsverfahren fort. Diese „Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo)“ erfolgt vorsorglich, ohne rechtliche Verpflichtung und ohne konkrete Veranlassung. Der Prozess der Überprüfung begann 2016 mit einem öffentlichen Workshop, welcher der Diskussion über das sinnvolle und notwendige Vorgehen bei der Überprüfung diente. Als Folge und unter Berücksichtigung der Diskussion wurden folgende vier Phasen für die ÜsiKo festgelegt:

- Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs,
- Phase 2: Aktualisierung von Sicherheitsanalysen,
- Phase 3: ggf. Anpassung der Planung,
- Phase 4: ggf. Umsetzung im Bau.

Ergebnis der Phase 1 der ÜsiKo ist eine Auflistung. Das Delta Nr. 36: „Bewertung von zusätzlichen Systemen zur Vermeidung der Kollision eines Fahrzeuges mit einem Hindernis“

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 15 von 97
		Stand: 19.02.2025

bildet die Basis für die hier vorliegenden Arbeiten im Rahmen der Phase 2 der ÜsiKo. Die vom Auftraggeber zur Verfügung gestellte Liste relevanter Unterlagen für das Endlager Konrad ist in Anhang 1 aufgeführt.

DMT GmbH & Co. KG mit ihren Unterauftragnehmern TÜV Nord Mobilität GmbH & Co. KG und IAV GmbH Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr hat ab dem 20.07.2021 das Themengebiet Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen unter Tage im Rahmen der Phase 2 der ÜsiKo bearbeitet.

Gemäß der Aufgabenstellung des Auftraggebers wird im folgenden Bericht eine Beschreibung der sicherheitsrelevanten Aspekte im PFB [1] bezüglich des Themengebiets Verkehrlenkung unter Tage (VluT) im Einlagerungsbetrieb erstellt. Im PFB [1] wurde festgestellt, dass mit den dort beschriebenen Schutzmaßnahmen eine sichere Einlagerung gewährleistet ist und somit ein ausreichendes Sicherheitsniveau gegeben ist. In dem vorliegenden Bericht wird geprüft, ob ein Einsatz von Fahrerassistenzsystemen bzw. von autonom betriebenen Fahrzeugen über die schon bestehenden Schutzmaßnahmen zur sicheren Einlagerung hinaus zu einem signifikanten Sicherheitsgewinn führt. Dabei werden die von der BGE seit Erteilung des PFB ergriffenen Schutzmaßnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit mitberücksichtigt. Zusätzlich wird betrachtet, ob die Einfahrt eines Fahrzeuges in einen gesperrten Streckenabschnitt (Überfahren einer roten Lichtsignalanlage) vermieden wird oder ob zusätzliche, ergänzende Maßnahmen sinnvoll sind.

Ziel des Projektes: Unter Abwägung aller Vor- und Nachteile soll ermittelt werden, ob der Einsatz von Fahrerassistenzsystemen bzw. Systeme für autonomes Fahren über die schon bestehenden Schutzmaßnahmen hinaus zu einem signifikanten Sicherheitsgewinn im Einlagerungsbetrieb führen können, um eine Kollision zu verhindern. Dabei wird dargelegt:

- welche Fahrerassistenzsysteme und Systeme für autonomes Fahren zurzeit existieren,
- welche Kriterien für die Beurteilung und Bewertung des Sicherheitsgewinns und der Fahrerassistenzsysteme und autonomen Fahrzeuge zugrunde gelegt werden sowie
- ob es Fahrerassistenzsysteme und/oder Systeme für autonomes Fahren für den Einlagerungsbetrieb gibt, die einen signifikanten Sicherheitsgewinn erzielen könnten.

## 2. Darstellung des sicherheitsrelevanten Deltas

Im Abschlussbericht zur „Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad (ÜsiKo) - Los I“ [2] ist aufgeführt, dass „im PFB zugrunde gelegten Stand von Wissenschaft und Technik (die Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke, die Störfall-Leitlinien und die Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk) [...] keine Aussagen über Kollisionen von Transportmitteln getroffen [wurden]“. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass die überwiegende Anzahl der Regelungen generell für kerntechnische Anlagen gelten und nicht dem Stand von W&T für Endlager für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung darstellen. Die Planfeststellungsbehörde hat sich bei ihrer Prüfung daran orientiert, soweit sie auf diese Endlager sinngemäß angewendet werden können.

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 16 von 97
		Stand: 19.02.2025

In Anlehnung an die ESK-Leitlinien für die Zwischenlagerung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung [3] ist der Anprall von Lasten bei Transportvorgängen bei der Bauwerksauslegung berücksichtigt werden [2]. Dies bedeutet, es ist ein Anprall von dem Fahrzeug mit der Bauwerksstruktur zu betrachten.

Im PFB ist die Betrachtung der Kollision von Transportmitteln getätigt worden. Dieser Bericht beschränkt sich auf die Kollision von Transportmitteln unter Tage. Gemäß PFB werden die mechanischen Belastungen bei Kollisionen mit dem Stoß durch die Festlegungen maximaler Fahrgeschwindigkeiten auch auf Gefällestrrecken bei den Transportwagen bzw. bei dem Stapelfahrzeug begrenzt. Höhere Belastungen bei Kollisionen können dann auftreten, wenn mehrere Fahrzeuge an einer Kollision beteiligt sind. Um dies zu verhindern, erfolgt eine Einrichtung einer Verkehrslenkung mittels Lichtsignalanlagen (LSA) unter Tage.

In der ÜsiKo Phase 1 wurde gezeigt, dass Vorsorgemaßnahmen zur Beherrschung von Kollisionen von Fahrzeugen mit baulichen Anlagenteilen, Systemen und Komponenten berücksichtigt wurden, um eine Beschädigung der transportierten Abfallgebinde zu verhindern. Es wurden jedoch keine mittlerweile verfügbaren technischen Möglichkeiten der Fahrerassistenzsysteme (z. B. Kollisions-, Abstands-, Spurhalteassistenzsystem) berücksichtigt. Daraus ist das Delta 36 abgeleitet worden.

Durch geeignete Fahrerassistenzsysteme oder den Einsatz von Systemen für autonomes Fahren könnte die Eintrittswahrscheinlichkeit für Kollisionen weiter reduziert werden. Dies gilt insbesondere für Fahrfehler, die auf menschliches Versagen zurückzuführen sind. Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Fahrfehlers kann gemäß [2] durch entsprechende technische Einrichtungen weiter verringert werden.

### **3. Allgemeine Randbedingungen**

In diesem Kapitel werden die Randbedingungen, unter denen die Einlagerungsvorgänge unter Tage durchgeführt werden, dargestellt. Dabei beruhen die Angaben teilweise auf Planungsgrundlagen und auf Erfahrungswerten aus der Errichtungsphase. Diese Angaben werden verwendet, um die Möglichkeiten zur Nutzung zum Beispiel von Sensoren zu bewerten.

Die Strecken für den Einlagerungsbetrieb sind zwischen 5 m und 6 m breit sowie zwischen 4,5 m und 5,5 m hoch und in Teilbereichen mit undefinierter Grubenraumgeometrie. In Teilbereichen wird die Strecke vollständig mit Betonschale und Stahlbeton-Fahrbahn ausgebaut. Die Fahrbahn ist aus gesiebtem und verdichtetem Haufwerk aufgebaut. Daher sind hier verschiedene Fahrbahnen und Grubenraumgeometrien zu berücksichtigen.

Im Einlagerungsbetrieb sind das Füllort und die Einlagerungskammern sowie Entladekammern ausreichend beleuchtet.

Das Grubengebäude ist trocken. Spritz- und Tropfwasser liegt nicht vor. Die relative Feuchte im Grubengebäude lässt sich im Jahresmittel mit knapp 35 % beziffern, bezogen auf eine durchschnittliche Trockentemperatur in den Hauptstrecken von 30 °C.

Bei bestimmten Wetterlagen kann es jedoch zu einer Kondensation von Luftfeuchtigkeit auf der Sohle kommen. Diese Feuchtigkeit bildet einen glatten Schmierfilm (Wasser-Staubgemisch) auf der Sohle.



Die Staubbelastung hängt im Wesentlichen von den Tätigkeiten ab, die zum jeweiligen Zeitpunkt durchgeführt werden. Bisher galt ein Staubgrenzwert von 4 mg/m<sup>3</sup> für A-Staub<sup>1</sup> und 10 mg/m<sup>3</sup> für E-Staub<sup>2</sup> je Arbeitsschicht. Es werden die gesetzlichen Grenzwerte eingehalten.

Es erfolgt eine regelmäßige, maßnahmenabhängige und örtlich gebundene Entstaubung im untertägigen Bereich des Endlagers Konrad sowie eine Fahrbahnbewässerung zur Staubbinding. Damit ist prinzipiell nicht auszuschließen, dass es zu einer rutschigen Fahrbahn kommen kann.

#### **Zu betrachtende Betriebszustände**

Es sind die Betriebszustände im Einlagerungsbetrieb zu betrachten. Daher wird der mögliche Sicherheitsgewinn für den Fahrbetrieb mit beladenen Transportwagen vom Füllort über die Knotenpunkte zu den Entladekammern, sowie für den Fahrbetrieb von Stapelfahrzeugen in den Entladekammern und in der Einlagerungskammern betrachtet. Auch Leerfahrten der Transportwagen, die potentiell mit beladenen Transportwagen kollidieren können, sowie die Beladung am Füllort werden berücksichtigt.

Der beladene Transportwagen startet am Füllort und fährt über die Knotenpunkte zu der entsprechenden Entladekammer. An den Knotenpunkten sind Lichtsignalanlagen installiert, an denen der Transportwagen bei entsprechendem Signal halten muss. Die betrachteten Fahrsituationen in anlageninternen Ereignissen beinhalten die Geradeausfahrt, die Fahrt auf einer Rampe, Kurvenfahrt und das Abbiegen an den Knotenpunkten. Es findet kein Rangierbetrieb und keine Rückwärtsfahrt des Transportwagens im beladenen Zustand statt.

Das Stapelfahrzeug wartet in der entsprechenden Entladekammer auf den beladenen Transportwagen, um die Abfallgebinde vom Transportwagen abzuladen. Dazu wartet der Transportwagen an der gekennzeichneten Halteposition vor der Entladekammer. Anschließend nimmt das Stapelfahrzeug die Abfallgebinde auf und verbringt diese, nach Zurückfahren des Transportwagens auf die Warteposition in der Kammerzufahrt, in die Einlagerungskammer. Die betrachteten Fahrsituationen in anlageninternen Ereignissen beinhalten das Entladen in der Entladekammer sowie das Abladen in der Einlagerungskammer. Das Stapelfahrzeug rangiert beim Entladen und Abladen der Abfallgebinde. Das Stapelfahrzeug fährt dabei auch rückwärts.

Im Folgenden wird der Begriff „Abfallgebinde“ verwendet. Dieser schließt neben den Containern auch die auf Tauschpaletten transportierten Rundgebinde ein.

## **4. Sicherheitstechnische Systeme zur Verhinderung von Kollisionen unter Tage bei der Errichtung und während des Betriebs des Endlagers Konrad gemäß PFB**

Das Einlagerungssystem des Endlagers Konrad beinhaltet die Tätigkeiten und technische Einrichtungen über Tage ebenso wie unter Tage und erstreckt sich über die Anlieferung von Abfallgebinden (Gebinde mit Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung) über Tage, über die Handhabung und Beförderung nach unter Tage bis hin zur Einlagerung in den

<sup>1</sup> Der Begriff A-Staub bezeichnet den Masseanteil des Staubs, der über die Atemwege infolge Einatmen in die Lunge eingeatmet wird und sich dort absetzt.

<sup>2</sup> Der Begriff E-Staub ist der Anteil am Staub, der eingeatmet werden kann.

Einlagerungskammern. Im Rahmen der Bearbeitung erfolgt die Betrachtung der Verkehrslenkung unter Tage (VluT) für den Bereich vom Füllort bis zu den Einlagerungskammern. Die Förderung der Abfallgebilde erfolgt via Schachtförderanlage von über Tage nach unter Tage. Der Portalhubwagen setzt die Abfallgebilde von dem Plateauwagen auf den jeweilig bereitstehenden Transportwagen. Die Transportwagen (max. 2 Fahrzeuge gleichzeitig im Einsatz) befahren die Transportstrecken zu den Einlagerungskammern und ein Stapelfahrzeug nimmt die Abfallgebilde vom Transportwagen auf und stellt es auf dem vorgesehenen Platz in der Einlagerungskammer ab.

Das Einlagerungssystem ist nachfolgend in Abbildung 1 abgebildet.

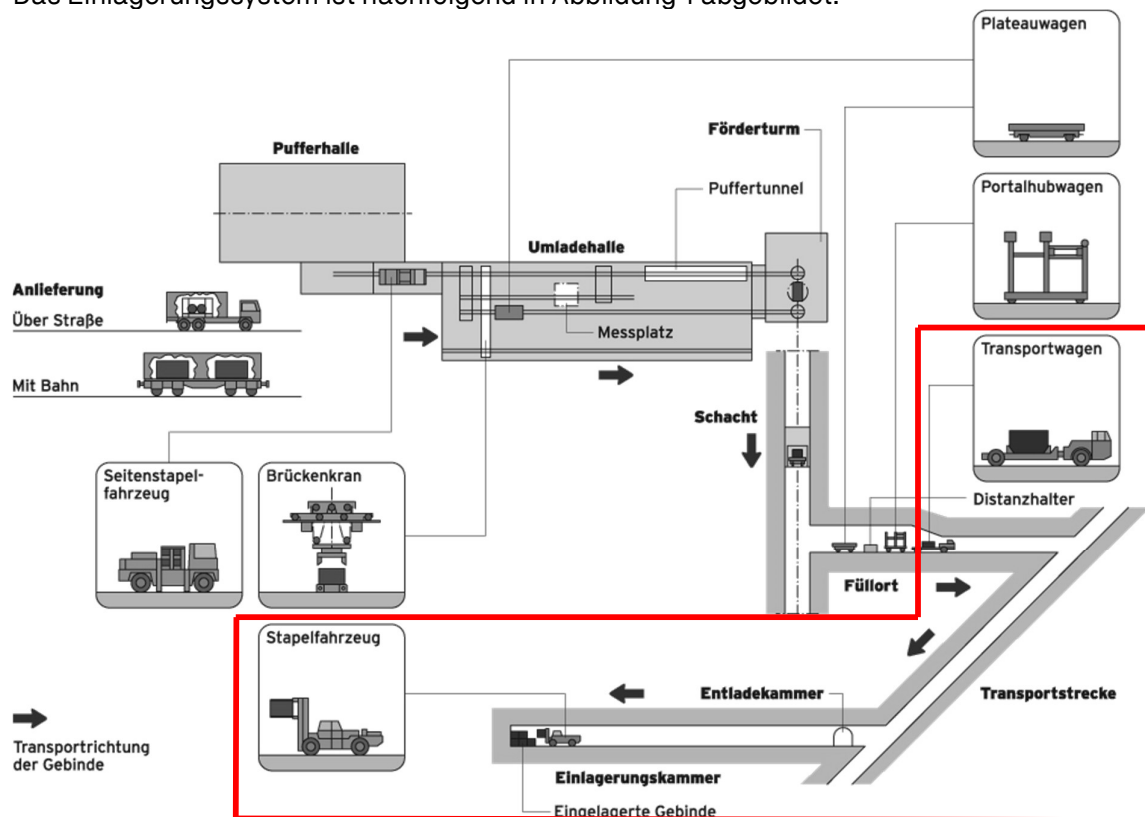


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Einlagerungsvorgangs

## 4.1 Betriebszustände

In den folgenden Abschnitten werden die im PFB definierten Betriebszustände für die VluT beschrieben. Der Normalbetrieb besteht aus dem Einlagerungsbetrieb und dem einlagerungsfreien Betrieb.

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 19 von 97
		Stand: 19.02.2025

### 4.1.1 Einlagerungsbetrieb

Gemäß der Unterlage „Beschreibung und technische Daten der Verkehrslenkung unter Tage“ [4] liegt der Einlagerungsbetrieb vor, wenn Transportvorgänge mit Abfallgebinden durchgeführt werden. Dazu werden in der VluT die Transportstrecken zwischen dem Füllort und der Einlagerungskammer für den mit einem Abfallgebinde beladenen Transportwagen vorgemerkt und reserviert. Der Transport der Abfallgebinde mittels Transportwagen erfolgt ausschließlich in Einbahnrichtung bis zur Entladekammer. Dort wartet der Transportwagen an der gekennzeichneten Halteposition vor der Entladekammer. Die Entladung des Transportwagens erfolgt mithilfe eines Stapelfahrzeugs. Dieses nimmt die Abfallgebinde auf und verbringt sie in die Einlagerungskammer. Die in diesem Abschlussbericht dargestellten Betrachtungen beziehen sich auf diesen Betriebszustand.

### 4.1.2 Einlagerungsfreier Betrieb

Gemäß der Unterlage [4] liegt ein einlagerungsfreier Betrieb vor, wenn keine Transportvorgänge mit Abfallgebinden durchgeführt werden. Außerhalb des Einlagerungsbetriebes des Endlagers kommt es dann insbesondere zu Fahrzeugbewegungen im Zusammenhang mit Versatzarbeiten, Instandhaltungstätigkeiten und im Rahmen von Fahrten der Betriebsaufsicht.

### 4.1.3 Anomaler Betrieb

Im anomalen Betrieb kann bei auftretenden Störungen der Einlagerungsbetrieb fortgeführt werden, soweit sicherheitstechnische Gründe dem nicht entgegenstehen. Die sichere Fortführung des Einlagerungsbetriebes wird durch zusätzliche organisatorische, technische und personelle Maßnahmen realisiert. Ein anomaler Betrieb gemäß der von der BGE zur Verfügung gestellten Unterlagen liegt nicht vor, wenn bei einer Störung der Einlagerungsbetrieb unterbrochen werden muss.

Gemäß den von der BGE zur Verfügung gestellten Unterlagen liegt ein anomaler Betrieb (Festlegung durch Betriebsleiter/andere Funktionsträger) vor, wenn – im Zusammenhang mit dem Betrieb der LSA - z. B. Störungen an den technischen Komponenten der VluT auftreten. Für den hier betrachteten Umfang der Fahrzeuge und Fahrstrecken zählen u. a. Störungen bei der Funktionsfähigkeit des Transportwagens, Ausfall der Funkverbindung gemäß Unterlage [5] oder Störungen an der Lichtsignalanlage (LSA)-Technik (ganz oder teilweise). Eine hierdurch entstandene Einschränkung des Einlagerungsbetriebes erfordert sofortiges Handeln (technische und administrative Maßnahmen).

## 4.2 Verkehrslenkung unter Tage

Gemäß den von der BGE zur Verfügung gestellten Unterlagen und EU 208 [6] besteht die VluT aus einer Kombination von administrativen, personellen und technischen Schutzmaßnahmen. Die in den zitierten Unterlagen genannten Schutzmaßnahmen werden unterstützt durch den Einsatz von Warnbaken für die Kennzeichnung definierter Fahrzeug-Haltepunkte, Verkehrsspiegeln in Entladebereichen sowie Beschilderungen und

Hinweistafeln. Die detektor- und funktionsüberwachten Lichtsignalanlagen sind an Kreuzungen, Einmündungen und Ausweichnissen installiert und mit dem Leitstand verbunden, wie in Abbildung 2 aufgeführt. In Abbildung 2 ist eine Ausweichnische nicht abgebildet, da zum Zeitpunkt der Untersuchung diese noch nicht aufgefahren war.

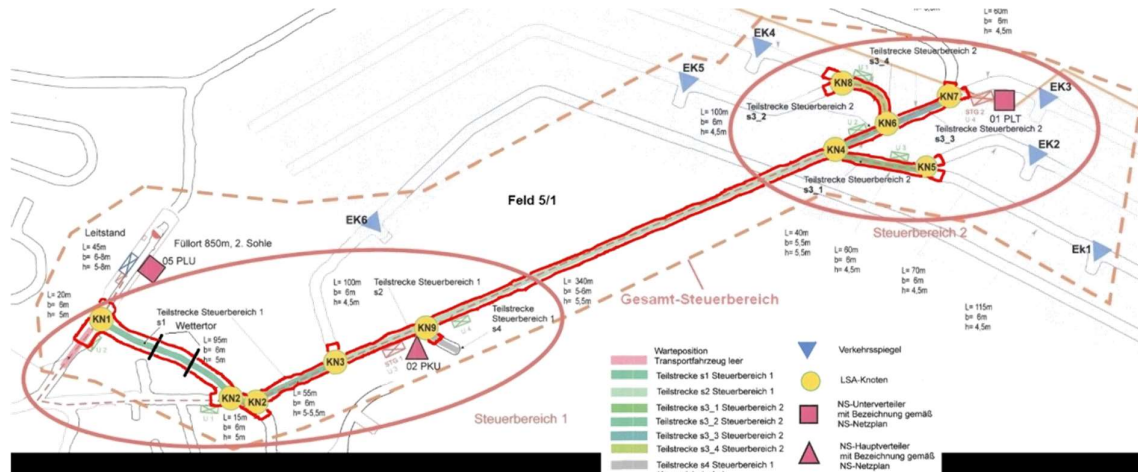


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Einlagerungstranstrecke

Gemäß der Unterlage [5] zeigen während des Einlagerungsbetriebes standardmäßig alle Signalgeber „Rot“. Der Transportwagen wird über optische Detektionsfelder (Kameras) der LSA erkannt. Die Zuordnung der Route (beladener/unbeladener Transportwagen) erfolgt durch die Steuerung der Lichtsignalanlage. Die Steuerung überprüft, ob:

- das detektierte Fahrzeug dem im Signalprogramm hinterlegten Fahrzeug(typ) entspricht und
- die angeforderte Teilstrecke (in die das Fahrzeug einfahren möchte) mit der im Signalprogramm hinterlegten und für das Fahrzeug reservierten Fahrtroute übereinstimmt.

Erst nach positivem Prüfergebnis schaltet die Steuerung den Lichtsignalgeber auf „Grün“ und gibt damit die nächste Teilstrecke für den Transportwagen zur Einfahrt frei. Er wird durch optische Detektionsfelder (Kameras) eindeutig als Transportwagen mit vorgeschriebener Route zur vorgesehenen Einlagerungskammer erkannt.

Weitere unter Tage eingesetzte Fahrzeuge sind in die Kategorie „Übrige Fahrzeuge“ eingeordnet und werden durch optische Detektionsfelder (Kameras) als solche identifiziert.

Es erfolgt eine Abmeldung aller Fahrzeuge durch die optischen Detektionsfelder beim Verlassen eines mit Lichtsignalanlage ausgestatteten Kreuzungs- oder Einmündungsbereichs. Anschließend werden die Signale auf „Rot“ geschaltet. Bei Einfahren in die Transportstrecke trotz rotem Lichtsignal (Einfahrverbot) werden der Fahrer und der Leitstand durch ein optisches und akustisches Signal gewarnt. Die automatisierte Warnung erfolgt ebenfalls, wenn ein Fahrzeug nach dem Durchfahren einer signalisierten Einmündung/Kreuzung nicht abgemeldet wird oder wenn von der VluT im überwachten Bereich eine nicht autorisierte Fahrzeugbewegung erkannt wird.

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 21 von 97
		Stand: 19.02.2025

#### **4.2.1 Einlagerungsbetrieb mit Verkehrslenkung unter Tage**

Im Einlagerungsbetrieb erfolgt die Umsetzung von administrativen und technischen Schutzmaßnahmen durch die VluT. Der Transportwagen mit Abfallgebinde hat Vorfahrt und die Strecke vom Füllort zur Einlagerungskammer ist reserviert. Die Fahrt erfolgt in Einbahnrichtung.

Fahrten von „übrigen Fahrzeugen“ oder Transportwagen ohne Abfallgebinde werden ausschließlich nach Weisung und unter Leitung (örtlicher Leitstand) durchgeführt.

Technisch sind die Transportwagen mit einer gelben, eingeschalteten Rundumleuchte ausgestattet, die im beladenen Zustand des Transportwagens mit einem Abfallgebinde eingeschaltet sein muss. An den Knotenpunkten erfolgt eine Leitung und Überwachung mittels der detektor- und funktionsüberwachten LSA.

#### **4.2.2 Einlagerungsfreier Betrieb**

Die LSA ist ausschließlich im Einlagerungsbetrieb aktiv, da kein Transport von Abfallgebinden im einlagerungsfreien Betrieb stattfindet. Die Verkehrssicherheit im einlagerungsfreien Betrieb erfolgt durch die Fahrzeugführer.

Der örtliche Leitstand ist im einlagerungsfreien Betrieb in der Regel nicht besetzt. Besetzt ist ausschließlich die Zentrale Warte Konrad 1.

### **4.3 Fahrzeuge**

Der Transportwagen und das Stapelfahrzeug weisen u. a. folgende relevante Eigenschaften hinsichtlich der Kollisionsvermeidung bzw. der Begrenzung von Kollisionsfolgen auf.

Die Fahrzeuge sind mit Licht und Kommunikationsgeräten (Grubenfunk) ausgerüstet. Damit ist eine Kommunikation zwischen dem örtlichen Leitstand im Füllort, dem Stapelfahrzeug und den Transportwagen sichergestellt. Die Kommunikation per Funk ist nur durch qualifiziertes Personal mit entsprechender Schulung und Unterweisung erlaubt.

#### **4.3.1 Transportwagen**

Der Transportwagen (TW) ist mit einer Sicherheitseinrichtung in der Antriebseinheit ausgestattet. Diese Einrichtung stellt sicher, dass der Transportwagen eine maximale Geschwindigkeit von 10 km/h durch seine technische Auslegung nicht überschreitet. Dieser liegt somit unter der durch die Auslegung der Abfallgebinde bedingten maximalen Geschwindigkeit von 4 m/s (14,4 km/h).

Es sind unterstützende Systeme am Füllort und Transportwagen installiert, um die korrekte Positionierung des Transportwagens für den Beladevorgang zu gewährleisten. Dazu sind Spurführungsbleche in der Fahrbahn des Füllorts eingelassen. Näherungsschalter und Puffer sind an der Anschlagfläche des Distanzhalters angebaut. Auf der Oberfläche des Transportwagens sind zwei Reflektoren angebracht, die in Verbindung mit zwei Lichtschranken in der

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 22 von 97
		Stand: 19.02.2025

Firste des Füllorts dem Fahrer des Transportwagens eine genaue Ausrichtung der Transportwagenlängsachse ermöglichen. Somit ist eine positionsgenaue Stellung des Transportwagens gewährleistet, die dem Transportwagenfahrer über ein Signalsystem angezeigt wird. Dieses Signalsystem (Lichtschranken) ist an den örtlichen Leitstand angebunden. Der Leitstand gibt den Einsatz des Portalhubwagens frei.

### **4.3.2 Stapelfahrzeug**

Das Stapelfahrzeug ist mit einer Sicherheitseinrichtung in der Antriebseinheit ausgestattet. Diese Einrichtung stellt sicher, dass das Stapelfahrzeug eine maximale Geschwindigkeit von 10 km/h durch seine technische Auslegung nicht überschreitet. Dieser somit unter der durch die Auslegung der Abfallbinde bedingten maximalen Geschwindigkeit von 4 m/s (14,4 km/h).

## **4.4 Schutzmaßnahmen**

Nachfolgend werden als Basis für die spätere Bewertung die bestehenden und für den Einlagerungsbetrieb relevanten Schutzmaßnahmen aufgeführt. In Tabelle 1 werden die Sicherheitsmaßnahmen in administrative (personell/organisatorisch), infrastrukturelle und technische Maßnahmen unterteilt und jeweils kurz die Maßnahme und deren Aufgabe für die Vermeidung von Kollisionen aufgelistet.

Tabelle 1: Vorhandene Schutzmaßnahmen

System	Technologie	Beschreibung und Funktion
<b>Administrative Schutzmaßnahmen</b>		
Arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchung	Sehtest, Hörtest, Belastungstest usw.	Die Fahrzeugbediener werden hinsichtlich ihrer Eignung zum Führen der Fahrzeuge wiederkehrend untersucht. Dadurch wird eine mögliche Gefahr von Kollisionen aufgrund gesundheitlicher Probleme reduziert.
Einweisung und Qualifizierung	Einweisung und Schulung	Eine sichere Bedienung der Systeme, wie z. B. dem TW oder dem Grubenfunk, sowie die Kenntnis über die vorgeschriebenen Betriebsabläufe ist nur mit qualifiziertem Personal möglich. Durch regelmäßige Unterweisungen und Schulungen wird die Gefahr von Fehlbedienungen reduziert.
Überwachung	Warten und Reinigen der Infrastruktur	Spiegel, Schilder, Lichtsignalanlagen oder Fahrwege werden zur Sicherstellung der Einsatzfähigkeit der infrastrukturellen Überwachungsmaßnahmen regelmäßig gewartet und gereinigt.
	Technische Prüfung von Geräten und Fahrzeugen	Technische Geräte vor Ort sind regelmäßig zu warten, Instand zu setzen bzw. durch einen technischen Dienst zu prüfen. Dadurch wird die Sicherstellung der Einsatzfähigkeit der infrastrukturellen Überwachungsmaßnahmen gewährleistet. Im Übrigen werden Fahrzeuge und ggfs. technische Einrichtungen durch wiederkehrenden Prüfungen (WKP) geprüft.
	Überwachen der Einhaltung der Maßnahmen	Im Rahmen von Begehungen, Audits oder auch durch Hinweise zu Missständen durch die Mitarbeiter wird die Einhaltung der administrativen Maßnahmen überwacht. Dabei werden auch ihre Aktualität bzw. Eignung überprüft. Mittels der Maßnahmen wird gewährleistet, dass die vorgegebenen administrativen Maßnahmen beachtet bzw. hinsichtlich ihrer Eignung überprüft werden.



Tabelle 1: Vorhandene Schutzmaßnahmen (Forts.)

<b>System</b>	<b>Technologie</b>	<b>Beschreibung und Funktion</b>
Vorgaben bzgl. der Fahrzeugführung	Geschwindigkeitsreglementierung	Durch das Festsetzen einer Maximalgeschwindigkeit (technische Begrenzung) bzw. vor Ort durch Geschwindigkeitsvorgaben (Schilder) wird die Gefahr von Kollisionen bzw. deren Schwere im Falle einer technischen Störung bzw. ausgelöst durch menschliches Fehlverhalten reduziert.
Funkkommunikation	Anmeldung und Freigabe beim Befahren definierter Streckenabschnitte	Im Einlagerungsbetrieb wird im Leitstand das Einfahren in einen Streckenabschnitt angemeldet. Der Leitstand überwacht die Abschnitte und erteilt die Freigabe zum Einfahren. Dies umfasst sowohl TW sowie andere Fahrzeuge (unplanmäßig). Unvorhergesehene Begegnungen entlang der Strecke sollen durch die Funkkommunikation und Anmeldung beim Befahren der Abschnitte vermieden werden. Die Gefahr einer Kollision mit anderen Fahrzeugen wird reduziert.
Funkkommunikation	Direkte Abstimmung zwischen Fahrzeugführern	Beim Einfahren in bestimmte Streckenabschnitte bzw. im Bereich von Engstellen muss eine direkte Kommunikation zwischen Fahrzeugführern per Funk erfolgen. Die Funkkommunikation hilft den Fahrern, Kollisionen zu vermeiden und sich in Bereichen mit viel Lärm sicher zu verständigen.
Zeitliche Vorgaben	Trennung von Betriebszuständen "Einlagerungsbetrieb" und "Einlagerungsfreier Betrieb"	"Einlagerungsbetrieb" und "Einlagerungsfreier Betrieb" sind zeitlich voneinander getrennt. Für den Einlagerungsbetrieb gelten definierte Vorgaben. Durch die Trennung der Betriebsmodi wird das Verkehrsaufkommen während des Einlagerungsbetriebs reduziert (Reduktion von potentiellen Kollisionsmöglichkeiten), gleichzeitig gelten dezidierte administrative, infrastrukturelle sowie technische Vorschriften.



Tabelle 1: Vorhandene Schutzmaßnahmen (Forts.)

<b>System</b>	<b>Technologie</b>	<b>Beschreibung und Funktion</b>
Fahrzeugbeleuchtung	Fahrzeugbeleuchtung	Alle Fahrzeuge fahren mit eingeschaltetem Fahrlicht. Abgestellte Fahrzeuge (im Einlagerungsbetrieb nicht vorgesehen), insofern sie nicht in einer vorgesehenen Abstellposition stehen, haben das Standlicht eingeschaltet. Liegengebliebene Fahrzeuge sind durch die Warnblinkanlage zu sichern. Mit Hilfe der Fahrzeugbeleuchtung wird zum einen die Sicht des Bedieners verbessert, zum anderen werden andere Personen im Umfeld gewarnt.
Vorfahrtsregelungen	Angepasste Vorfahrtsregelungen	Beladene TW haben generell Vorfahrt vor unbeladenen TW. Unbeladene TW sind ausweich- und wartepflichtig. Es gelten Sonderregelungen an einzelnen Punkten der Strecke, die durch Schilder gekennzeichnet sind.

Tabelle 1: Vorhandene Schutzmaßnahmen (Forts.)

Infrastrukturelle Schutzmaßnahmen		
System	Technologie	Beschreibung und Funktion
Passive Systeme	Spiegelsysteme	Verbaute Spiegelsysteme im Bereich von Kreuzungen oder Kurven, bei Kammerzufahrten sowie in schwer einsehbaren Abschnitten helfen frühzeitig Gegenverkehr zu erkennen und die Gefahr von Kollisionen zu reduzieren.
	Ausweichnischen	Nutzung von Ausweichnischen (aktuell nur eine geplant) entlang der Transportstrecke, damit beladene TW begegnungsfrei passieren können. Die Ausweichnische wird vom unbeladenen TW angefahren.
	Warnbaken	Warnbaken kennzeichnen definierte Fahrzeug-Haltepunkte, z. B. vor den LSA-Lichtsignalgebern, den Kammerzufahrten, das Füllort-Einfahrt oder vor Wetterschleusen und reduzieren somit die Gefahr von Kollisionen durch falsch abgestellte Fahrzeuge.
	Beschilderung und Hinweistafeln	Mittels Schildern und Hinweistafeln werden administrative Vorgaben gemacht bzw. vor Gefahrenstellen gewarnt.
Dynamische Verkehrslenkung	Sperrung von Abschnitten durch LSA	<p>Die LSA zeigt dem Fahrer am Haltepunkt an, ob eine Weiterfahrt erlaubt ist oder ein Halt/Stopp durchzuführen ist.</p> <p>Durch die Erfassung von Fahrzeugen durch die LSA wird erkannt, ob ein Halte-Signal ggf. überfahren wurde. Dadurch wird frühzeitig Gegenverkehr erkannt und die Gefahr einer Kollision wird durch daraufhin ausgelöste Schutzmaßnahmen (optische/akustische Warnung) vermieden. Weiterhin wird geprüft, ob ein TW entgegen der Halte-Signal-Regelung einen Bereich befahren hat.</p>

Tabelle 1: Vorhandene Schutzmaßnahmen (Forts.)

Infrastrukturelle Schutzmaßnahmen		
System	Technologie	Beschreibung und Funktion
Führungshilfen	Spurführungsbleche	Trogförmige Spurführungsbleche dienen als Orientierungshilfe für den Fahrer des TW am Füllort. Durch den Einsatz der Spurführungsbleche für die Räder des TW (Zwangsführung) wird die Gefahr einer Kollision mit der Infrastruktur reduziert und der TW präziser positioniert.
	Optische Anzeigen	Zwei Näherungsschalter am Distanzhalter reagieren auf Kontakt mit dem TW und aktivieren zwei Leuchten. Diese Schalter werden bei der korrekten Positionierung des Fahrzeugs aktiviert und zeigen dem Fahrer an, dass er die Halteposition zur korrekten Aufnahme von Abfallgebinden erreicht hat.
		Über ein Spiegelsystem mit Lichtschranken und Signalleuchten wird die korrekte Position des Wagens angezeigt. Der Fahrer des TW sieht anhand einer Anzeige, dass er die korrekte Position des TWs angefahren hat.
Begrenzung Fahrzeugschwindigkeit	Fahrzeugseitige Überwachung	Über Sicherheitseinrichtungen ist die max. Geschwindigkeit auf 10 km/h technisch reglementiert gemäß den von der BGE zur Verfügung gestellten Unterlagen [7]. Die Gefahr von Kollisionen bzw. deren Schwere wird im Falle einer technischen Störung bzw. ausgelöst durch menschliches Fehlverhalten reduziert.
Anzeige Fahrzeugzustand	Leuchttabelleaus	Am Fahrzeug befinden sich sogenannte „Leuchttabelleaus“, die den Zustand des TWs nach außen anzeigen (z. B. dem Fahrer des Stapelfahrzeugs). Zustände sind z. B. "abladen frei" oder "beladen frei". Vor dem Beladen oder der Entnahme von Abfallgebinden vom TW muss der TW vom Fahrer in einen sicheren Zustand überführt werden. Dies wird nach Außen durch ein Leuchttabelleau angezeigt. Dies reduziert die Gefahr der fehlerhaften Be-/Entladung, die zu Kollisionen und/oder Beschädigungen der Fahrzeuge sowie der Abfallgebinde führen kann.

Tabelle 1: Vorhandene Schutzmaßnahmen (Forts.)

Technische Schutzmaßnahme		
System	Technologie	Beschreibung und Funktion
Lichtsignalanlage (LSA)	Detektion der Überfahung des Haltepunktes trotz ROT-Anzeige	<p>Die LSA zeigt dem Fahrer am Haltepunkt an, ob eine Weiterfahrt erlaubt ist oder ein Halt/Stopp durchzuführen ist. Innerhalb der LSA-Steuerung erfolgt eine Selbstprüfung auf Funktionstüchtigkeit.</p> <p>Nach der Erfassung des Überfahrens des Haltesignals über ein Detektionsfeld (Kamera) hinter dem Haltepunkt durch die LSA, aktiviert diese optische und akustische Warnungen vor Ort und im Leitstand. Dies reduziert die Gefahr, dass sich im Einlagerungsbetrieb mehrere Fahrzeuge in einem Streckenabschnitt befinden und es zu Kollisionen kommt. Das System der LSA kann die Einfahrt in gesperrte Streckenabschnitte erkennen und anzeigen. Aktiv verhindern kann die LSA dies jedoch nicht.</p>

## 5. Zusätzliche technische Systeme zur Verhinderung von Kollisionen unter Tage bei der Errichtung und für den Betrieb des Endlagers Konrad im Vergleich zum PFB

### 5.1 Schutzmaßnahmen bei der Errichtung des Endlagers

Im untertägigen Bereich ist aktuell (Errichtungsphase) für die Vermeidung von Kollisionen ein System der Fa. Indurad eingesetzt. Dieses Kollisionswarnsystem erlaubt die Erkennung von anderen Personen, Fahrzeugen und Geräten, die jeweils mit einem entsprechenden Modul bzw. Transponder ausgestattet sind. Die Ausrüstung der Fahrzeuge, Personen und Betriebsmittel ist in der folgenden Tabelle 2 beschrieben.

Ortsfeste Betriebsmittel werden nicht mit einem Transponder versehen und sind daher visuell nur durch den Fahrer zu identifizieren und zu erkennen.

Das vorhandene Kollisionswarnsystem detektiert/erfasst somit nur die anderen Module und Transponder und nicht die örtliche Umgebung (Stöße etc.). Vor einer Kollision mit dem Stoß oder ortsfesten Betriebsmitteln warnt dieses System nicht.

Tabelle 2: Komponenten des Kollisionswarnsystems

Typ	Modul	Beschreibung
Großfahrzeuge	BV-Modul	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Erfassung aller Einheiten (Groß- und Kleinfahrzeuge, Geräte und Personen) im 360° Winkel und Anzeige der Positionen einschließlich der Abstände der Transponder auf einem Display.</li> </ul>
Kleinfahrzeuge	CV-Modul	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Erkennt andere/weitere Groß- und Kleinfahrzeuge sowie die ortsveränderlichen Geräte. Personen (Transponder im Helm) werden nicht erkannt.</li> <li>■ Es erfolgt die Darstellung der Abstände zu den erkannten Einheiten durch Farben (rot, gelb, grün).</li> </ul>
Mitarbeiter	Transponder	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Signalgeber</li> </ul>
Ortsveränderliche Geräte	CE-Modul	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Signalgeber</li> </ul>
Ortsveränderliche Betriebsmittel	Transponder	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Signalgeber</li> </ul>

## 5.2 Zusätzliche Schutzmaßnahmen für den Betrieb des Endlagers

Gemäß den von der BGE zur Verfügung gestellten Unterlagen wird das Stapelfahrzeug mit einem Kamerasystem ausgestattet. Das Kamerasystem besteht aus insgesamt acht Kameras. Sechs davon sind direkt am Spreader befestigt; eine Schwenkkamera befindet sich am oberen Ende des Hubgerüsts und eine Kamera dient der Gebindeverfolgung:

- Zwei steuerbare Kameras befinden sich am Spreader in der Nähe der oberen Zapfen, sodass mit ihnen die Verriegelung von Containern oder der Gabelzinken visuell überwacht werden kann.
- Zwei weitere steuerbare Kameras sind am Spreader so montiert, dass sie im Gabelbetrieb (Einlagerung von Rundgebinden) die Spitzen der Gabelzinken erfassen. Mit ihrer Hilfe kann der Stapelfahrzeugfahrer die Aufnahme von Tauschpaletten/ Abfallgebinden durchführen.
- In der Nähe der beiden unteren Zapfen des Spreaders befinden sich zwei festverbaute Kameras, die direkt in den Spreader montiert sind. Diese Kameras ermöglichen dem Stapelfahrzeugfahrer bei der Aufnahme von Containern die Sicht auf die unteren ISO-Ecken und damit die Kontrolle der Zapfen-Verriegelung.

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 30 von 97
		Stand: 19.02.2025

- Die siebte Kamera ist eine Schwenkkamera, die sich am oberen Ende des Hubgerüsts befindet und eine 360° Rundumsicht ermöglicht.
- Die achte Kamera dient zur Erkennung der in der ELK angelieferten Gebinde und zur bildlichen Dokumentation der Stapelabschnitte.

Der Fahrer des Stapelfahrzeugs hat zu jeder Zeit die Möglichkeit, sich die Bilder einer der genannten Kameras in der Fahrerkabine anzeigen zu lassen.

## **6. Vorgehensweise zur Bewertung von Fahrerassistenzsystemen und autonomen Systemen**

Die Bewertung von Fahrerassistenzsystemen und autonomen Systemen erfolgt anhand verschiedener Kriterien und verschiedener Stufen. Basis sind dabei die bereits durch den PFB definierten Systeme. Diese gewährleisten die Sicherheit beim gesamten Betrieb des Endlagers Konrad. Aufbauend auf diesen Systemen werden zusätzlich die relevanten, derzeit auf dem freien Markt verfügbaren Fahrerassistenzsysteme und autonomen Systeme bzgl. deren technischen Eignung betrachtet und bewertet.

Die Vielzahl an Fahrerassistenzsystemen und autonomen Systemen wird dahingehend beurteilt, ob diese bereits praxistauglich sind. Die Praxistauglichkeit wird anhand einschlägiger Erfahrungen im Bereich des Bergbaus, idealerweise unter Tage, oder durch Erfahrungen mit vergleichbarer Voraussetzung definiert.

Ist die Praxistauglichkeit gegeben und sind die Systeme erprobt bzw. bewährt, erfolgt eine Bewertung, ob die Fahrzeugassistenzsysteme oder autonomen Systeme geeignet sind, um eine Kollision unter Tage im Einlagerungsbetrieb vermeiden zu können. Im nächsten Schritt erfolgt eine Bewertung der Fahrerassistenzsysteme und autonomen Systeme, ob ein Sicherheitsgewinn durch die Implementierung in die bestehenden Systeme gemäß PFB gegeben ist.

Ein möglicher weiterer Sicherheitsgewinn ist im letzten Schritt dahingehend zu beurteilen, ob er die – bereits hinreichend gewährleistete – Sicherheit über das erforderliche Maß hinaus verbessert. Ein geringfügiger, theoretisch erreichbarer Sicherheitsgewinn, der für den Einlagerungsbetrieb eine kaum wahrnehmbare Verbesserung der Sicherheit in der Praxis zur Folge hat, wird nicht weiter betrachtet. Diese qualitative Bewertung („expert opinion“) der Systeme mit Sicherheitsgewinn hinsichtlich des signifikanten Sicherheitsgewinns nach dem hier definierten Verständnis liefert dann die Basis für abschließende Empfehlungen. Der Ablauf ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt.

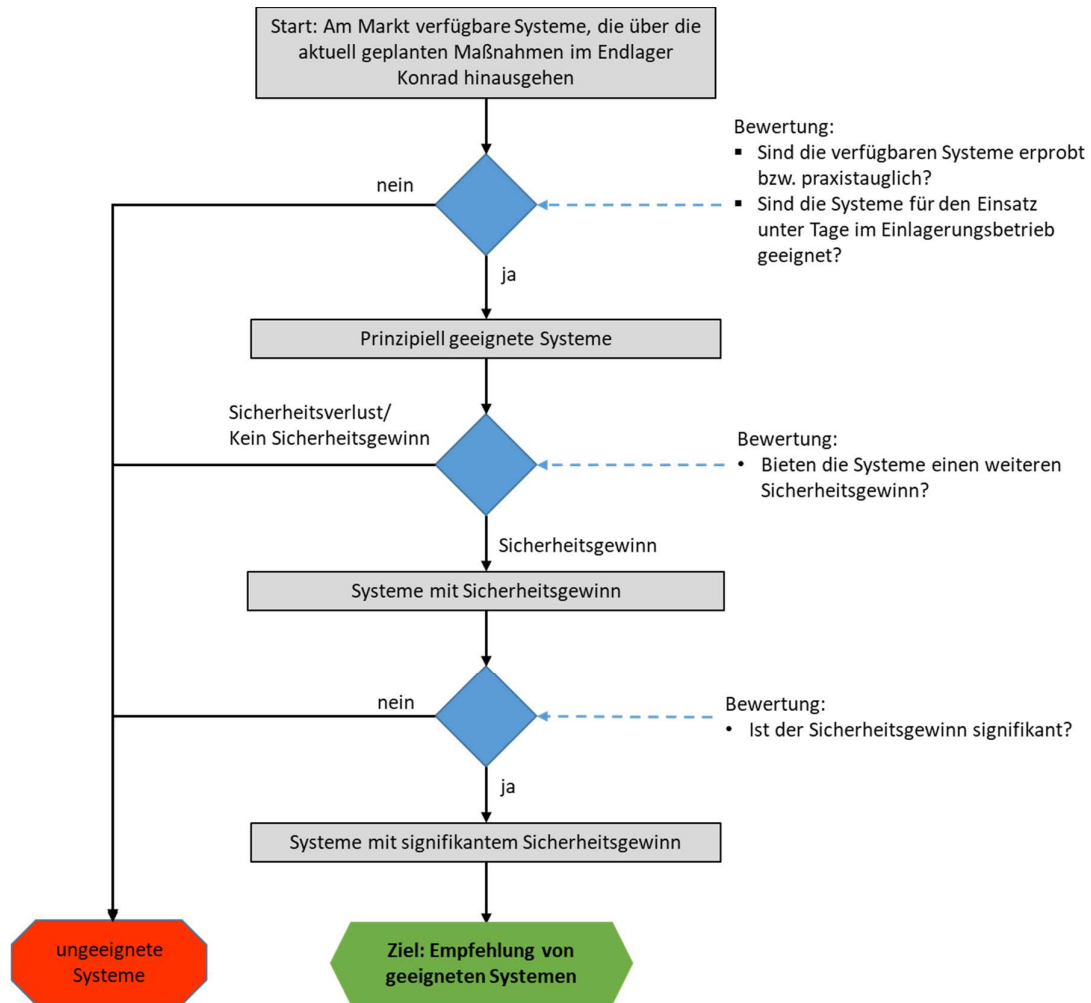


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Bewertung von Fahrerassistenz- bzw. autonomen Systemen

## 7. Beschreibung von Fahrerassistenzsystemen und autonomen Fahrzeugen mit Bezug zu den Projektzielen

### 7.1 Grundlegende Einordnung von Fahrerassistenzsystemen und autonomen Systemen

Zur Unterscheidung von Fahrerassistenzsystemen in teil-, hoch- und vollautomatisierte Systeme wurden in den vergangenen Jahren diverse Definitionen erstellt. Insbesondere im Bereich des Straßenverkehrs bzw. des Automobils hatte sich zuletzt die Einteilung des Bundesamtes für Straßenverkehr (BaSt) bzw. der Society of Automotive Engineers (SAE) etabliert.

Die nachfolgende Abbildung 4 zeigt die Einteilung der SAE J3016 in die sechs Stufen der Automatisierung, wie sie seit 2019 gilt.

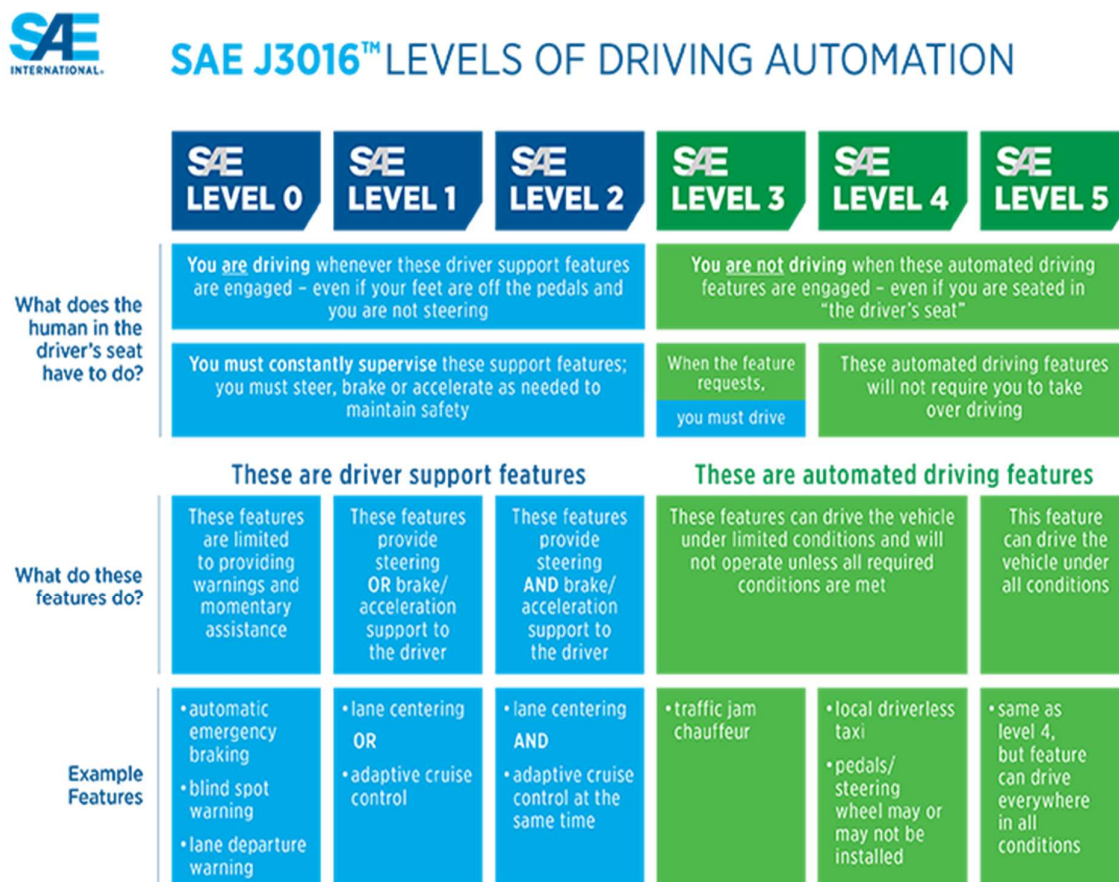


Abbildung 4: Level der Fahrzeugautomatisierung nach SAE [8]

Die blau hinterlegten, ersten drei Level umfassen im Wesentlichen Fahrerassistenzsysteme. Level 0 betrachtet dabei ausschließlich Systeme, die dem Fahrer Warnungen ausgeben bzw. in kritischen Situationen automatisch und zeitlich stark limitiert aktiv in die Quer- und Längs-



	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 33 von 97
		Stand: 19.02.2025

führung eingreifen. In Level 1 erfolgt dieser Eingriff für den Fahrer bewusst über einen längeren Zeitraum, entweder in die Längs- oder Querführung, wohingegen in Level 2 beide Formen parallel geregelt werden. Der Fahrer bleibt jedoch in jedem Fall weiterhin in der Verantwortung und muss die Assistenzfunktionen permanent überwachen. In den grün hinterlegten Leveln 3-5 wird der Fahrer sukzessive von der Fahraufgabe befreit bzw. muss nach Aufforderung innerhalb definierter Zeiträume (Level 3) die Steuerung wieder übernehmen. Während die Einsatzumgebungen und -bedingungen für Level 4 noch eingeschränkt sind, muss das Fahrzeug in Level 5 überall und in allen Situationen selbstständig agieren können. Im täglichen Sprachgebrauch, wie auch im vorliegenden Dokument, werden derartig vollautomatisierte Systeme häufig auch als autonome Systeme bezeichnet. Bei diesen ist weder Lenkrad noch Pedalerie zwingend notwendig.

Auch wenn eine direkte Überführung dieser Definition hinsichtlich der Projektziele nicht ohne Weiteres möglich ist, erlaubt die Tabelle dennoch eine grundsätzliche Einordnung über die Stufen der Fahrerassistenz bis hin zu autonomen Systemen in Level 4 und 5. Eine auf die Randbedingungen unter Tage zugeschnittene Systematik müsste eigens entwickelt werden.

## **7.2 Fahrerassistenzsysteme bei mobilen Arbeitsmaschinen und Bergbaufahrzeugen**

Gemäß Abbildung 4 umfassen Fahrerassistenzsysteme im Wesentlichen Schutzmaßnahmen, die den Fahrer von monotonen Aufgaben entlasten, ihn in komplexen Situationen mit relevanten Informationen unterstützen bzw. in kritischen Situationen kurzzeitig regelnd eingreifen. In jedem Fall liegt die Verantwortung beim Menschen, der die Systeme jederzeit übersteuern kann. Ein solches Fahrerassistenzsystem für Untertageanwendungen könnte beispielsweise in der Fahrzeugmitte verbaut sein und könnte den vom Fahrerplatz aus nicht einsehbaren Fronbereich zur Verhinderung von Kollisionen mit Personen erfassen [9], Der Fahrer erhält im Gefahrenfall akustische und optische Warnhinweise.

Für den geplanten Einsatz von Fahrzeugen auf Konrad wurde bereits ein umfangreiches Sicherheitskonzept erarbeitet und planfestgestellt. Der Mensch vor Ort im Fahrzeug bildet dabei ein wesentliches Sicherheitselement im Gesamtbetrieb, da nur er die Fähigkeit besitzt, mögliche Gefahren und Probleme in ihrer Entstehung zu antizipieren und zu bewerten. Ein großer Teil der möglichen Situationen unter Tage wird bereits durch technische Mittel beherrscht. Soweit menschlichen Einflussfaktoren noch eine Rolle spielen, lassen sich diese durch weitere Optimierungsmaßnahmen verringern.

Vor diesem Hintergrund können die hier vorgestellten Fahrerassistenzsysteme einen positiven Beitrag zur Reduktion der menschlichen Einflussfaktoren leisten.

Als ein Untergebiet der Fahrerassistenz werden im Rahmen des Dokumentes zudem die teleoperierten Systeme aufgeführt, bei denen der Fahrerarbeitsplatz vom Fahrzeug ausgelagert ist. Vorteile solcher Ansätze liegen in der Entlastung des Fahrers von den unwirtschaftlichen Situationen vor Ort, um einem raschen Ermüden vorzubeugen.

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 34 von 97
		Stand: 19.02.2025

### 7.3 Autonome Fahrzeugkonzepte

Vollständig autonome Fahrzeugkonzepte für den Untertagebetrieb sind seit einigen Jahren im kommerziellen Betrieb von Großminen im Einsatz [10, 11]. Ein wesentliches Aufgabengebiet der Fahrzeuge ist die Transporttätigkeit zwischen definierten Punkten innerhalb bekannter und überwachter Bereiche. Ein Beispiel dafür ist das Automine Konzept der skandinavischen Firma Sandvik, das erstmals um die 2000er Jahre vorgestellt wurde [12]. Mit der in den Folgejahren umgesetzten Erweiterung Automine-Lite, kann das Fahrzeug entlang definierter Streckenabschnitte automatisch geführt werden, der Fahrer überwacht lediglich den Prozess und muss im Störfall mit Hilfe einer Fernsteuereinheit eingreifen. Folglich können solche Lösungen als Level 3 Funktion angesehen werden.

Auch außerhalb des Mining Bereichs nehmen autonom geführte Fahrzeuge (AGVs) im Bereich der Intralogistik seit vielen Jahren einen festen Platz ein. Beispielsweise wird im Hamburger Containerterminal Altenwerder ein solches AGV eingesetzt, mit dem Container zwischen den Ladekränen und den Zwischenlagern transportiert werden [13]. Die Fahrzeuge folgen definierten Routen, eine Lokalisierung basiert auf RFID-Transponder im Fahrbahnuntergrund, die im Raster angeordnet sind. Gesteuert werden die Fahrzeuge von einem Leitreechner. Das gesamte Hafengelände ist abgesperrt, vor Personenzutritt werden alle Fahrzeuge in einen sicheren Zustand überführt. Eine direkte menschliche Überwachung eines AGVs ist nicht mehr notwendig und es gibt kein Lenkrad oder Pedalerie, so dass diese gemäß Definition ein Level 4 erreichen.

Die Motivation für den Einsatz hochautomatisierter bzw. autonomer Systeme liegt im Wesentlichen in einer Kostenoptimierung durch die Einsparung von Personal. Weitere Faktoren sind die Entlastung der Bediener von monotonen, anstrengenden, gefährlichen oder ermüdenden Tätigkeiten oder schlichtweg ein Mangel an qualifiziertem Personal. Seltener steht die Steigerung der Prozesssicherheit im Fokus der Entwicklung. Insbesondere bei komplexen Szenarien mit vielen Einflussfaktoren ist dies mitunter nicht sinnvoll, da der Aufwand, das System für alle möglichen Situationen und Szenarien zu qualifizieren, in keinem Verhältnis zum Sicherheitsgewinn steht.

Wie bereits in Abschnitt 7.2 beschrieben, ist der Mensch in solchen Fällen durch seine Fähigkeit, unbekannte Situationen zu abstrahieren und zu antizipieren, gegenüber einer Maschine, die für eine definierte Tätigkeit spezifiziert wurde, deutlich überlegen. Beispielsweise kann ein Mensch Fremdgeräusche, die auf einen bevorstehenden Ausfall von Fahrzeugkomponenten hindeuten, frühzeitig erfassen und klassifizieren, um mögliche Folgeschäden zu verhindern. Eine derartige Fähigkeit ist für hochautomatisierte bzw. autonome Systeme häufig mit hohen Entwicklungsaufwänden verbunden. Da die Exposition des Betriebspersonals in den betrachteten Szenarien nicht im Fokus dieses Berichts liegt, werden im weiteren Verlauf keine vollständig autonomen Systeme für den vorliegenden Betrachtungsraum berücksichtigt. Vor dem Hintergrund eines verbesserten Strahlenschutzes würden auch autonome Systeme weiter in Betracht gezogen werden können. Grundsätzlich ist zu empfehlen einen Prozess als Teil der Prozessführung aufzusetzen, in welchem die kontinuierliche Beobachtung zum Stand von Wissenschaft und Technik weiterhin beobachtet wird sowie die Fahrerassistenzsysteme, welche aus Kapitel 13 hervorgehen, weiterhin zu überprüfen und zu analysieren.

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 35 von 97
		Stand: 19.02.2025

## 8. Systemübersicht

Die nachfolgende Übersicht führt unterschiedliche Fahrerassistenz- und Automatisierungslösungen auf, mit denen mögliche Kollisionen unter Tage verhindert werden können. Sie erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da die Menge an Systemen und deren vielfältigen Varianten und Ausprägungen nahezu unerschöpflich ist. Daher wird vielmehr eine grobe Einordnung unterschiedlicher Systeme vorgenommen und deren grundsätzliche Funktionsweise beschrieben. Ebenfalls werden bei der Bewertung der Systeme ausschließlich die Einzelsysteme an sich bewertet. Eine Kombination unterschiedlicher Systeme untereinander wird nicht betrachtet. In einem zweiten Schritt werden hieraus Systeme ausgewählt, deren Praxistauglichkeit durch einschlägige Erfahrungen, idealerweise im Endlagerbetrieb, oder aber unter vergleichbaren Voraussetzungen nachgewiesen wurde. Diese werden näher betrachtet, um eine Einschätzung für den konkreten Anwendungsfall der Kollisionsvermeidung während des Einlagerungsbetriebs abgeben zu können.

### 8.1 Einordnung von Fahrerassistenzsystemen mit Bezug zu den Projektzielen

Im Folgenden werden zunächst die unterschiedlichen Systeme dargestellt, die grundsätzlich für Einsatzfälle unter Tage geeignet sein könnten. Für jedes der Systeme wird kurz bewertet, ob sie auch mit den geplanten Projektzielen in Einklang stehen.

#### 8.1.1 Systeme zur Stabilisierung der Fahrzeugführung

Systeme für eine sichere und stabile Fahrzeugführung greifen auf Grundlage von Sensordaten aktiv und für einen limitierten Zeitraum in die Quer- und Längsführung eines Fahrzeugs ein. Vor allem in Grenzbereichen der Fahrdynamik unterstützen die Systeme den Fahrer, um ein unkontrolliertes Fahrverhalten des Fahrzeugs aktiv zu unterbinden. Zu den bekanntesten Systemen aus dem Straßenverkehr zählen sicherlich das Anti-Blockier-System (ABS) oder das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP).

Beim ABS erfassen Drehzahlsensoren in den einzelnen Rädern ein plötzliches Blockieren der Räder während eines Bremsmanövers. Das System regelt daraufhin den Bremsdruck für jedes Rad individuell unterhalb der Blockiergrenze, so dass jedes Rad weiterhin verzögert, jedoch gleichzeitig noch Querführungskräfte übertragen werden können und das Fahrzeug lenkbar bleibt.

Im Falle des ESP berechnet ein Steuergerät anhand von Fahrgeschwindigkeit und aktuell anliegendem Lenkwinkel die erwartete Rotation des Fahrzeugs um seine Hochachse während einer Kurvenfahrt. Diese Daten werden mit den Werten eines Drehratensensors abgeglichen, der die reale Rotation des Fahrzeugs ermittelt. Widersprechen sich diese Werte, da das Fahrzeug während der Kurvenfahrt beispielsweise stärker rotiert als erwartet, spricht man von Übersteuern und das System bremst die kurvenäußeren Räder aktiv ab, um dem Übersteuern entgegenzuwirken. Im Falle eines Untersteuerns werden die kurveninneren Räder abgebremst, um die Lenkwirkung zu verstärken. In beiden Fällen wird das Fahrzeug durch die Eingriffe auf der gewünschten Kreisbahn gehalten.

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 36 von 97
		Stand: 19.02.2025

Derartige Systeme sind bei Fahrzeugen im Straßenverkehr seit Jahren gesetzlich vorgeschrieben und erprobt. Auch im Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen, insbesondere bei Fahrzeugen mit höheren Fahrgeschwindigkeiten, kommen sie teilweise zum Einsatz. Im Rahmen des vorliegenden Anwendungsfalls, mit den geringen Fahrgeschwindigkeiten von Stapelfahrzeug und Transportwagen während des Endlagerbetriebs, kommen die Vorteile der beschriebenen Systeme nicht zum Tragen, so dass sie im Folgenden nicht weiter betrachtet werden.

### **8.1.2 Kamerabasierte Umfeldvisualisierung**

In die Fahrzeugstruktur integrierte Kamerasysteme können dem Fahrer dabei helfen, ein umfängliches Bild der Fahrzeugumgebung zu erhalten, insbesondere in die vom Arbeitsplatz aus schwer einsehbaren Bereiche. Die Kameradaten werden auf einem Monitor im Innenraum angezeigt und helfen dem Fahrer, Kollisionen im Falle von Engstellen oder beim Rangieren zu verhindern. Darüber hinaus existieren Systeme auf Grundlage ortsfester Kameras außerhalb eines Fahrzeugs, die ihre Videodaten per Funk auf den Kabinenmonitor übertragen, und dem Fahrer ggf. ein deutlich besseres Lagebild geben, als dies durch fahrzeuginterne Kameras möglich wäre.

Interne als auch externe, funkangebundene Kamerasysteme zur Umfeldvisualisierung sind im Straßenverkehr sowie in weiten Bereichen der mobilen Arbeitsmaschinen umfangreich erprobt und getestet. Zudem kommen serienmäßige Kamerasysteme aktuell in der Endlager Konrad bei den Befahrungsfahrzeugen zum Einsatz, um bei der Rückwärtsfahrt zu unterstützen. Dahingehend wird von einer prinzipiellen Eignung für den vorliegenden Anwendungsfall ausgegangen.

### **8.1.3 Fahreraufmerksamkeits- und Fahrerzustandserfassung**

Im Schienenverkehr sind Systeme zur Sicherstellung der Fahreraufmerksamkeit in Form sogenannter Totmannschalter seit vielen Jahrzehnten etabliert und erprobt. Der Zugführer hat dem System seine Aufmerksamkeit durch Betätigen eines Schaltkontaktes in regelmäßigen Abständen aktiv anzuzeigen. Andernfalls wird das Fahrzeug nach einer vorangegangenen Warnphase in einen sicheren Zustand überführt.

Bei PKWs und LKWs werden aktuell Lenkradsensoren genutzt, die die vom Fahrer aufgebrauchten Lenkmomente erfassen bzw. über kapazitive Sensoren erkennen, ob der Fahrer die Hände am Lenkrad hält. Andernfalls erfolgt eine Warnung. Über einen Einsatz solcher Lenkradsensoren im Bereich von mobilen Arbeitsmaschinen bzw. im Bergbau ist gegenwärtig nichts bekannt. Hingegen werden Joysticks mit kapazitiven Sensoren derzeit bei Radladern und Traktoren eingesetzt, um ein unbeabsichtigtes Betätigen des Joysticks zu detektieren. Erst wenn die Hand am Joystick erkannt wurde, wird die Joystick-Bedienung freigeschaltet.

Weitere Systeme im Straßenverkehr schätzen die Fahreraufmerksamkeit aktuell durch eine Auswertung des Fahrverhaltens ab, z. B. aufgrund unerwartet starker Lenkmanöver, häufigem Verlassen der Fahrspur oder die verstrichene Zeit seit Beginn des Fahrzyklus. Darauf aufbauend erhält der Fahrer Empfehlungen für das Einlegen einer Pause. Weiterführende Systeme nutzen sogenannte Fahrerbeobachtungskameras, die die Aufmerksamkeit oder die

Müdigkeit des Fahrers anhand von dessen Blickrichtung, Lidschlagreflex, Gähnen und weiteren menschlichen Faktoren überwachen. Auch die Ablenkung, beispielsweise durch die Bedienung eines Mobiltelefons, wird von den Kameras erkannt, was entsprechende Warnungen zur Folge hat. Im Bereich des Straßenverkehrs werden derartige "Driver Attention Systems" auf Basis der EU-Verordnung 2019/2144 für neue PKW-Typzulassungen zeitnah verpflichtend eingeführt. Auch wenn Fahrerbeobachtungskameras für mobile Arbeitsmaschinen derzeit noch nicht im Einsatz sind, wird gegenwärtig davon ausgegangen, dass sie für den vorliegenden Anwendungsfall grundsätzlich geeignet sind.

### **8.1.4 Kollisionsmeldesysteme**

Taktile Sensoren an Front und Heck des Fahrzeugs, z. B. in Form sogenannter Sicherheitsbumper erfassen Kollisionen zwischen dem Fahrzeug und Objekten innerhalb der Fahrumgebung [14,15]. Sie werden vor allem bei automatisierten Flurförderzeugen genutzt, um Folgekollisionen zu vermeiden und das Fahrzeug in einen sicheren Zustand zu überführen. Zudem werden Meldungen an den Leitstand abgesetzt.

Bei PKW und LKW werden anstatt taktile Sensoren spezielle Crash- bzw. Beschleunigungssensoren innerhalb der Fahrzeugstruktur verbaut, die stark negative Beschleunigungswerte aufgrund von Kollisionen erfassen. Nach erkannter Kollision und Abschätzung deren Schwere werden entsprechende Sicherheitsmaßnahmen eingeleitet. Unter anderem folgt eine Aktivierung der Bremsen, um mögliche Folgekollisionen zu verhindern. Zudem wird über das sogenannte e-Call System eine Notfallmeldung per Mobilfunk an eine Leitstelle ausgesendet und eine Sprachverbindung mit dem Fahrer hergestellt. Weiterhin werden im Unfalldatenschreiber des Fahrzeugs relevante Daten während der letzten Sekunden vor der Kollision zu Dokumentationszwecken aufgezeichnet.

Da im Rahmen des Projektes auf eine Vermeidung von Kollisionen abgezielt wird, und nicht auf eine Verhinderung von Folgekollisionen, liegen solche Systeme außerhalb des Betrachtungsraumes und werden daher nicht weiter berücksichtigt.

### **8.1.5 Funkbasierte Nahbereichskommunikation**

Systeme zur Nahbereichskommunikation per Funk können den Fahrer unterstützen, Informationen von umliegenden Systemen übersichtlich auf einem Anzeigegerät innerhalb der Kabine zu erhalten. So lassen sich beispielsweise die Daten von Lichtsignalanlagen, der Zustand von Fahrzeugen in der unmittelbaren Umgebung und weitere Parameter in die Kabine übertragen. Gleichzeitig können Signale aus der Kabine heraus versendet werden, um beispielsweise Schrankenanlagen anzusteuern.

Funksysteme für die unterschiedlichsten Datentypen und Reichweiten sind im Bereich von Flurförderzeugen als auch bei mobilen Arbeitsmaschinen seit vielen Jahren im Einsatz und hinreichend erprobt und werden daher nachfolgend weiter betrachtet.

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 38 von 97
		Stand: 19.02.2025

## 8.1.6 Fahrzeuglokalisierung

Lokalisierungssysteme ermöglichen die Bestimmung der Fahrzeugposition innerhalb der relevanten Streckenabschnitte. Sie bilden das Rückgrat für eine Vielzahl nachgelagerter Fahrerassistenzsysteme, beispielsweise für optimierte Navigationsempfehlungen, etwaige Warnungen beim Überfahren von Haltesignalen oder um dem Leitstand ein aktuelles Bild über die Position aller relevanten Fahrzeuge zu liefern. Ist die Fahrzeugposition als auch der Streckenverlauf hinreichend genau bekannt, so kann die aktuelle Fahrzeugposition auch für eine automatisierte Fahrzeugführung genutzt werden.

Da Lokalisierungssysteme auf Basis von Satellitensignalen für Untertageanwendungen ungeeignet sind, bieten sich Lösungen auf Grundlage digitaler Karten an, in der die Positionen ortsfester, lokal referenzierter, identifizierbarer Merkmale entlang der Strecken hinterlegt sind. Diese Merkmale können beispielsweise einzelne Funkübertragungssysteme entlang der Strecke sein, die bereits für einen Datenaustausch genutzt werden. Anhand der Signalstärke des Fahrzeugs zu diesen Funksystemen und durch eine Fusion mit weiteren Informationen kann die Fahrzeugposition auf wenige Meter bis Zentimeter genau bestimmt werden. Alternativen bilden optische oder induktive Marker an den Firsten, dem Stoß oder der Fahrbahn, wie z. B. QR- oder RFID-Tags, die über Sensoren am Fahrzeug erfasst werden. Im zuvor beschriebenen Fall spricht man von Selbstlokalisierung. Von Fremdklokalisierung wird gesprochen, wenn die definierten Marker auf dem Fahrzeug montiert sind, und diese Marker, bzw. folglich die Fahrzeugposition, über ortsfeste Sensoren entlang der Strecke erfasst werden. Über einen erprobten und praxistauglichen Einsatz derartiger Lösungen für Untertageanwendungen ist derzeit nichts bekannt, so dass diese Varianten im Folgenden nicht weiter betrachtet werden.

Bei einer weiteren Form der Lokalisierung wird mittels fahrzeugseitiger 2D- und 3D-Sensoren der Streckenverlauf und die Streckenkontur erfasst, um diese mit den geometrischen Daten einer zuvor erstellten, digitalen Karte abzugleichen. Werden weitere Fahrzeugdaten hinzugezogen, wie z. B. Fahrgeschwindigkeit und Lenkwinkel, kann die Position des Fahrzeugs innerhalb der Karte und somit der Strecke auf wenige Zentimeter genau bestimmt werden. Diese Form der Lokalisierung wird aktuell bereits für Lösungen im Untertagebetrieb eingesetzt und ist somit erprobt und praxistauglich. Diese Variante wird im Folgenden weiter betrachtet.

## 8.1.7 Positionierhilfen

Für eine präzise Positionierung von Aufnahmevorrichtungen im Nahbereich können optische Markierhilfen eingesetzt werden. Bei Flurförderzeugen werden heutzutage Linien- oder Kreuzlaser verbaut, um dem Fahrer visuell die Position der Aufnahmevorrichtung relativ zu einem aufzunehmenden Gegenstand anzuzeigen, um folglich Kollisionen zu vermeiden. Bei automatisierten Robotersystemen werden hingegen codierte Marker auf Objekten dazu verwendet, eine Identifizierung des Objektes sowie weitere Informationen anzuzeigen, wie z. B. die Art der Aufnahmepunkte oder deren Position relativ zum Marker. Es handelt sich dabei also ebenfalls um eine Form der Lokalisierung, wie sie im vorherigen Abschnitt für das Fahrzeug beschrieben wurde. Grundsätzlich sind die Systeme erprobt und praxistauglich, so dass sie im Folgenden näher betrachtet werden [16].



	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 39 von 97
		Stand: 19.02.2025

### **8.1.8 Sensorbasierte Umfelderkennung zur Kollisionsvermeidung**

Mittels einer sensorbasierten Umfelderkennung können informierende, warnende oder auch aktiv eingreifende Assistenzfunktionen umgesetzt werden um Kollisionen zu vermeiden. Technologisch basieren die Systeme in der Regel auf bildgebenden Sensoren, wie z. B. Mono-, Stereo- oder Wärmebildkameras, 3D-Kameras auf Basis von Lichtlaufzeitmessungen (Time-of-Flight), Lidar- bzw. Radarsensoren als auch Ultraschallsensoren, um nur einige zu nennen [17, 18, 19, 20, 21, 22]. Je nach geforderter Funktion folgt eine nachgelagerte Datenverarbeitung, um beispielsweise Informationen aufzubereiten oder zu plausibilisieren.

Im Falle von informierenden Systemen werden dem Fahrer optisch oder akustisch Informationen über die aktuelle Umfeldsituation mitgeteilt. Beispiele dafür sind farbliche Darstellungen auf dem Kabinenmonitor über die Position und den Abstand zu Hindernissen in Kombination mit akustischen Signalen. Auch ein gezieltes, aktives Beleuchten von Objekten im Umfeld, z. B. durch die Fahrzeugscheinwerfer, zählt zu den informierenden Systemen.

Bei warnenden Systemen wird die Information für den Fahrer hingegen erst übermittelt, insofern eine konkrete Gefahr einer Kollision droht. Auch in diesem Fall wird der Fahrer akustisch, optisch bzw. haptisch durch Vibrationen des Lenkrads oder des Sitzes über die drohende Gefahr informiert. Ein Eingriff in die Längs- und Querverführung des Fahrzeugs erfolgt nicht, jedoch sind die Systeme eventuell geschärft um schneller reagieren zu können, wenn ein aktiver Eingriff des Fahrers erfolgt.

Im Fall von aktiv eingreifenden Systemen wird hingegen der Fahrer-Eingriff kurzfristig übersteuert, um Kollisionen aktiv zu verhindern bzw. deren Schwere zu reduzieren.

Im Bereich des Straßenverkehrs sind derartige Systeme bereits seit vielen Jahren erprobt und etabliert. Auch im Bergbaubereich gibt es eine Vielzahl von Sensoren zur Umfelderkennung, so dass diese Systeme im Folgenden weiterhin betrachtet werden.

### **8.1.9 Kamerabasierte Erfassung von Lichtsignalanlagen**

Mit Hilfe einer Frontkamera am Fahrzeug kann der Zustand von entgegenkommenden LSA im Bereich vor dem Fahrzeug erfasst werden, um ein unbeabsichtigtes Überfahren eines Haltesignals zu verhindern. Moderne Fahrerassistenzsysteme greifen für die Erkennung der Position der LSA und die Bestimmung der Lichtfarbe häufig auf künstliche neuronale Netze zurück, die mit einer Vielzahl von Trainingsdaten aus dem Straßenverkehr für den entsprechenden Anwendungsfall optimiert wurden. Die neuronalen Netze verarbeiten z. B. ein rotes LSA-Signal (Ampel) und verknüpfen dies mit der aktuellen Geschwindigkeit des Fahrzeugs, rechnen ggf. aber auch eine aktuelle Beschleunigung oder Verzögerung mit ein [23].

Sollte der vom System errechnete Bremsweg nicht mehr ausreichend sein, um das Fahrzeug mit moderater Verzögerung vor der Haltelinie zum Stillstand zu bringen, erfolgt eine optische und akustische Signalisierung an den Fahrer.

Da die Systeme für einen Betrieb im Straßenverkehr trainiert wurden und Informationen über eine Praxistauglichkeit unter Tage nicht vorliegen, werden derartige Systeme im Folgenden nicht weiter betrachtet.

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 40 von 97
		Stand: 19.02.2025

### 8.1.10 Fahrerassistenzsysteme zur Fahrzeugführung

Mittels Fahrerassistenzsystemen für eine automatisierte Quer- und Längsführung soll der Fahrer aktiv bei der Fahraufgabe unterstützt werden, um Kollisionen zu vermeiden, beispielsweise infolge von Unaufmerksamkeit. Aktuelle Systeme basieren entweder auf der Erfassung lokaler Leitlinien, aktuellen Sensordaten vom Umfeld oder auf dem Einsatz einer digitalen Karte in Kombination mit einer präzisen Lokalisierung. Auch Kombinationen dieser Lösungen sind etabliert.

Bei der Querführung anhand lokaler Leitlinien sind entlang der Strecke optische, magnetische oder induktive Leitlinien eingebracht, die von einer Kamera bzw. von unterhalb des Fahrzeugs angebrachten Sensoren erfasst werden. Dabei wird die Position der Leitlinie relativ zum Fahrzeug ausgewertet, um das Fahrzeug immer mittig darüber zu führen. Leitlinien sind im Bereich der Intralogistik stark verbreitet, setzen jedoch saubere, befestigte Untergründe voraus, was im Bergbau nicht gegeben ist. Eine Montage optischer Leitlinien entlang der Firste wäre ebenfalls eine Möglichkeit, jedoch erfordert dies aufgrund der starken Staubbelastung unter Tage eine häufige Reinigung der nach oben gerichteten Kameras. Daher wird diese Art der Fahrzeugführung im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Die Fahrzeugführung mittels aktueller Sensordaten vom Umfeld basiert auf Informationen von Lidarsensoren oder 3D-Kameras, die den vorliegenden Streckenabschnitt vermessen und einen kollisionsfreien Pfad, die sogenannte Trajektorie, für die Querführung berechnen. Ist die Trajektorie nicht befahrbar, beispielsweise aufgrund von Hindernissen, wird aktiv in die Längsführung eingegriffen, um vor dem Hindernis anzuhalten. Solche Systeme sind im Bereich der Robotik umfangreich erprobt, über den Untertageeinsatz ist hingegen nichts bekannt, so dass sie nicht weiter betrachtet werden.

Bei der kartenbasierten Querführung wird die aktuelle, präzise erfasste Position des Fahrzeugs in Bezug zu einer digitalen Streckenkarte mit einer darin verzeichneten, imaginären Leitlinie gesetzt. Die Leitlinie spiegelt die ideale Fahrstrecke des Fahrzeugs wider. Das System regelt das Fahrzeug durch den Eingriff in die Querführungs-Aktorik präzise entlang der Trajektorie von einem Start- zu einem Zielpunkt.

Derartige Verfahren sind heutzutage bereits im Einsatz und hinreichend erprobt und werden im Verlauf des Dokumentes näher betrachtet.

### 8.1.11 Teleoperierte Systeme

Ein wesentliches Ziel teleoperierter Systeme ist es, den Menschen von widrigen Bedingungen im unmittelbaren Fahrzeugumfeld zu entlasten, z. B. durch weniger Vibrationen, eine optimale Klimatisierung oder Arbeitsplätze mit Tageslicht. Zudem wird der Fahrerwechsel erleichtert und die Möglichkeit für eine direkte, ungestörte Kommunikation mit dem Fahrer eines anderen Fahrzeugs geschaffen, welches ebenfalls teleoperiert vom Nachbarplatz angesteuert wird.

Teleoperierte Fahrzeuge sind in der Regel mit Kamerasystemen, Mikrofonen, Beschleunigungssensoren und ggf. weiteren Sensoren ausgerüstet, um einem entfernten Fahrzeugbediener ein möglichst realistisches Fahrzeugumfeld zu liefern. Die Daten werden per Funk oder



	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 41 von 97
		Stand: 19.02.2025

über eine Kabelschnittstelle an einen Bedienstand übertragen, der einem klassischen Fahrzeugarbeitsplatz nachempfunden ist. Dort zeigen Monitore die verschiedenen Status- und Kameradaten an, Lautsprecher spielen Audiosignale aus dem Fahrzeugumfeld ab und Fahrzeugvibrationen werden auf den Bedienerstuhl übertragen. Mit Hilfe von Joysticks, Pedalen oder Lenkrädern werden Fahrbefehle entgegengenommen und zurück an das Fahrzeug versendet. Bei einem Signalabriss wird das Fahrzeug automatisch in einen sicheren Zustand überführt. Grundsätzlich bleibt die Funktionsweise von Fahrerassistenzsystemen von dieser räumlichen Trennung unberührt.

Für Untertageanwendungen sind derartige Systeme bereits heute im Einsatz und hinreichend erprobt, so dass sie Teil der weiteren Betrachtung bleiben.

## **8.2 Darstellung geeigneter Systeme für den betrachteten Anwendungsfall**

Im Folgenden werden für die im vorangegangenen Abschnitt als grundsätzlich geeignet betrachteten Formen von Fahrerassistenzsystemen weiterführende Informationen mit konkretem Bezug zu einem möglichen Einsatz im Endlager Konrad dargestellt.

### **8.2.1 Kamerasysteme für den Transportwagen**

Bedingt durch die Fahrzeuggeometrie des Transportwagens und den dadurch eingeschränkten Sichtbereich des Fahrers unmittelbar im Fahrzeugumfeld besteht grundsätzlich die Möglichkeit von Kollisionen, insbesondere im Fall von Engstellen (siehe Kap. 8.1.2). Durch den Einsatz von Kameras am Transportwagen könnten die schlecht einsehbaren Bereiche erfasst und dem Fahrer auf einem Monitor in der Kabine angezeigt werden. Weiterhin existieren Szenarien, in denen fahrzeugseitig montierte Kameras nur bedingt helfen würden, um das Lagebild für den Fahrer zu verbessern. In diesen Fällen könnten Bilder externer, ortsfest verbauter Kameras auf dem Kabinenmonitor übertragen werden, um einen neuen Blickwinkel und ggf. Detailaufnahmen erlangen zu können.

An relevanten Stellen des Fahrzeugs könnten Kameras in die Außenhülle des Fahrzeugs integriert und die Bilddaten auf einen Monitor in der Kabine übertragen werden. Dort würden die Kamerabilder entweder zusammengeführt und als sogenanntes Topview-Bild (Draufsicht) visualisiert, oder es würden die verschiedenen Kamerabilder im Kachelformat angezeigt werden [24, 25, 26]. Die Daten fahrzeugexterner Kameras würden hingegen per Funk übertragen, von einer Empfangseinheit auf dem Fahrzeug entgegengenommen und ebenfalls auf dem Monitor angezeigt werden. Der Einbauort der externen Kameras im Grubengebäude würden so gewählt werden, dass der Fahrer sein Fahrzeug von außen sehen bzw. Detailaufnahmen erhalten könnte, beispielsweise hinsichtlich einer optimalen Positionierung am Füllort oder in der Einlagerungskammer.

## 8.2.2 Fahrerbeobachtungskameras

Zur weiteren Optimierung könnte innerhalb der Fahrzeugkabine könnte eine Fahrerbeobachtungskamera verbaut werden, die auf den Fahrer und insbesondere dessen Gesicht gerichtet wird (siehe 8.1.3) [27, 28, 29, 30]. Eine daran angeschlossene Auswerteeinheit würde Kopfbewegungen, Blickwinkel etc. erfassen. Daraus könnten Aussagen über den Fahrerszustand, wie etwa dessen Aufmerksamkeit, seine Müdigkeit, gesundheitliche Probleme oder eine eventuelle Ablenkung abgeleitet werden. In diesem Fall erfolgt eine akustische und optische Warnung in der Kabine. Bei ausbleibender Reaktion würde der Entzug der Fahrfreigabe erfolgen, ein sicherer Betriebszustand würde hergestellt werden (z. B. ein durch das System kontrolliertes Abbremsen und Halten) und eine Warnmeldung würde an den Leitstand, z. B. per Grubenfunk, abgesetzt werden. Das System müsste anschließend aktiv quittiert werden, um die Fahrfreigabe wiedererlangen zu können.

## 8.2.3 Übertragung von LSA-Daten per Nahbereichskommunikation

Gemäß aktuellem Planungsstand sind Lichtsignalanlagen an den jeweiligen Knotenpunkten unter Tage installiert, mit deren Hilfe die technische Verkehrslenkung während des Einlagebetriebs durchgeführt wird (Abbildung 5, siehe Kap. 8.1.5). Durch die Erweiterung der LSA um eine Nahbereichskommunikation, sogenanntes WPAN, könnte dem Transportwagen unter Berücksichtigung seiner aktuellen Fahrtrichtung der Status der LSA per Funk mitgeteilt werden.

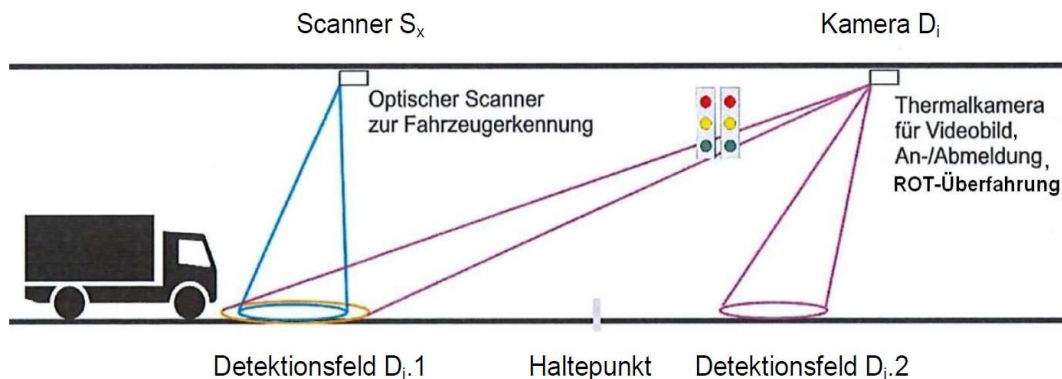


Abbildung 5: Aktuell geplantes System der LSA ohne Nahbereichskommunikation zur Erfassung eines Rotlicht-Verstoßes mittels Detektionsfeld

Die zu übertragende Information würde von einer Empfängereinheit im Transportwagen ausgewertet und dem Fahrer auf einem Monitor visualisiert werden. Darüber hinaus würde ein Piktogramm den vom Transportwagen einzufahrenden Streckenabschnitt anzeigen, vergleichbar mit der Anzeige bei einem Navigationssystem. Neben dieser Darstellung würde die aktuelle Fahrgeschwindigkeit vom Fahrzeugsteuergerät abgefragt werden. Bei einem Haltesignal muss die Geschwindigkeit bzw. die Verzögerung innerhalb definierter Grenzbereiche liegen, da andernfalls ein rechtzeitiges Anhalten am Haltepunkt nicht mehr möglich wäre. In diesem Fall würde der Fahrer akustisch und optisch gewarnt werden. Würde der Haltepunkt trotz Warnung überfahren oder würde der Transportwagen in den falschen Streckenabschnitt

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 43 von 97
		Stand: 19.02.2025

einfahren und die Detektoren der LSA erfassen diesen Zustand, würde per Nahfeldkommunikation ein Halt-Befehl an alle Fahrzeuge in der direkten Umgebung des Knotenpunktes abgesetzt werden und der örtliche Leitstand würde informiert werden. Als Konsequenz würde das Fahrzeug angehalten und der Zwangshalt auf dem Kabinenmonitor angezeigt werden. Erst durch manuelle Quittierung durch den Fahrer könnte das System reaktiviert werden, um das Fahrzeug „bewusst“ aus dem Detektorbereich heraus weiterzuführen.

#### **8.2.4 Übertragung von Fahrzeuginformationen per Nahbereichskommunikation**

Das Be- und Entladen des Transportwagens darf ausschließlich bei definierten Fahrzeugzuständen erfolgen, wie z. B. angezogener Feststellbremse oder geöffneten Verriegelungsbolzen der Sicherung der Abfallgebände. Die visuelle Anzeige in Form eines Leuchttableaus am Transportwagen gibt Auskunft über die Belade- oder Entladebereitschaft des Transportwagens [31]. Da diese ggf. für den Fahrer des Stapelfahrzeuges oder den Bediener des Portalhubwagens nicht immer optimal zu erfassen sein könnte, beispielsweise in Folge von Verschmutzungen, könnten diese Informationen parallel per Nahbereichsfunk in die Kabine des Stapelfahrzeuges bzw. den örtlichen Leitstand übertragen und dort angezeigt werden. Dadurch würde die Gefahr von Kollisionen bzw. Störungen bei der Aufnahme bzw. Entnahme der Abfallgebände reduziert werden. Dazu würden aktuelle Statusinformationen, wie z. B. der Status des Leuchttableaus am Transportwagen über ein Steuergerät abgegriffen und über Nahbereichsfunk, sogenanntes WPAN, an einen Empfänger im Stapelfahrzeug übertragen werden. Es handelt sich hierbei um eine digitale Datenkommunikation.

#### **8.2.5 Optische Markierungen als Positionierhilfe**

Optische Markierungen können einen Beitrag leisten, um denkbare Kollisionen weitergehend auszuschließen. Gleichzeitig gibt es unterschiedliche Gebindearten und -formen, an die sich die Aufnahmeeinrichtungen anpassen müssen. Optische Markierhilfen könnten den Bediener beim Verladen unterstützen (siehe Kap. 8.1.7).

Bei einem aktiven System wäre in der Aufnahmeeinrichtung ein Kreuzlinienlaser verbaut. Ein weiterer, versetzt angeordneter Kreuzlinienlaser würde Licht in einem definierten Winkel gegenüber dem ersten Laser aussenden. Position und Abstand beider Laserkreuze zueinander würden Rückschlüsse über die Distanz und die Ausrichtung der Aufnahmeeinrichtung gegenüber dem Gebinde erlauben [32, 33]. Der Fahrer vom Stapelfahrzeug könnte sehr präzise die Ausrichtung seiner Werkzeuge abschätzen.

Beim passiven System würde sich ein gedruckter Marker an einer definierten Position auf dem Abfallgebände befinden, z. B. ein sogenannter QR-, AR- oder Aruco-Tag, wie im vorangehenden Abschnitt in Abschnitt 8.1.7 exemplarisch dargestellt wurde. In dem Marker wären codiert Informationen hinterlegt, z. B. die Art der Transporteinheit oder die Position von Aufnahmepunkten. Der Marker würde von einer Kamera erfasst werden, die an einer definierten Stelle in der Aufnahmeeinrichtung am Stapelfahrzeug verbaut wäre. Der Bediener des Stapelfahrzeuges würde auf einem Monitor Informationen über den Abstand und den Winkel zum Abfallgebände erhalten, oder ob die Aufnahmeeinrichtung zum jeweiligen Abfallgebände passt.

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 44 von 97
		Stand: 19.02.2025

Zudem könnten Hinweise und Empfehlungen über den Anfahrtsweg bzw. optische und akustische Warnungen, z. B. bei nicht korrekter Positionierung des Fahrzeugs gegenüber dem Abfallgebinde, ausgegeben werden.

## **8.2.6 Hinderniserkennung zur Kollisionsvermeidung**

Ziel des Systems ist es, Kollisionen mit Umgebungsobjekten, wie z. B. anderen Fahrzeugen, Personen oder dem Stoß wirksam zu verhindern (siehe Kap. 8.1.8). Dafür würde das Umfeld des Transportwagens bzw. Stapelfahrzeuges mittels fahrzeugseitig montierter Lidarsensoren an Front und Heck permanent überwacht werden. Würden Objekte in den sogenannten Warnbereich eintreten, so würde der Fahrer zunächst eine visuelle und akustische Warnung erhalten. Würde sich das Objekt weiter annähern und in den inneren Schutzbereich eintreten, ohne dass die Fahrgeschwindigkeit angepasst werden würde, könnte ein Notbremsmanöver ausgeführt werden. Etwaige Hindernisse bzw. die Kontur des Stoßes würden auf dem Kabinenmonitor angezeigt werden [34].

Neben Lidarsensoren, deren Messprinzip in dem dargestellten Fall auf einem rotierenden Laserkopf beruht, der die Distanz zur Umgebung permanent abtastet, kommen in der Regel auch Stereokameras, Time-of-Flight Kameras bzw. Radarsensoren zum Einsatz. Ultraschallsensoren sind im Bereich mobiler Maschinen eher selten im Einsatz, da sie aufgrund hochfrequenter, akustischer Emissionen in Folge eventueller Leckagen im Druckluftsystem der Maschine gestört werden.

Unabhängig von der Art des eingesetzten Messprinzips würden sich derartige Systeme in der Regel auch als Nachrüstlösung eignen.

## **8.2.7 Automatisierte Quer- und Längsführung**

Das System könnte den Fahrer bei der Führung entlang einer bekannten, zuvor kartierten Strecke zwischen einem definierten Start- und Zielpunkt unterstützen. Dafür müsste im Vorfeld die zu fahrende Strecke anhand präziser 3D-Sensorik vermessen und in eine digitale Karte überführt werden. In einem zweiten Schritt würde für die einzelnen Strecken eine kollisionsfreie Trajektorie definiert werden, der das Fahrzeug folgen soll (siehe Kap. 8.1.10).

Wie eine präzise vermessene und kartierte Strecke als dreidimensionale Karte aus einzelnen Messpunkten aussehen würde, wird in [35] dargestellt. In Rot sind die aktuellen Messpunkte zweier Lidarsensoren an Front- und Heck vom Fahrzeug eingezeichnet. Durch Überlagerung der aktuellen Messpunkte mit den Karteninformationen und durch Fusion mit der Fahrgeschwindigkeit und dem aktuellen Fahrzeuglenkwinkel könnte die Position innerhalb der Strecke präzise definiert werden. Danach würde das Fahrzeug entlang einer in der Karte zuvor festgelegten Trajektorie bzw. eines Fahrschlauches geführt werden, wie im rechten Bildausschnitt gezeigt. Ziel wäre es, einen größtmöglichen Abstand zum Stoß einzuhalten.

Je nach Ausprägung des Systems könnte auch die Längsführung automatisiert werden, so dass der Fahrer die Geschwindigkeit nicht mehr aktiv regeln, sondern eine Zielgeschwindigkeit definieren, oder das System die vorgesehene Geschwindigkeit, die in der Karte hinterlegt ist, nutzen würde. Der Fahrer würde jedoch grundsätzlich in der Verantwortung bleiben und müsste das System im Störungs- oder Fehlerfall manuell übernehmen können.

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 45 von 97
		Stand: 19.02.2025

Derartige Lösungen sind für den Transportwagen prinzipiell geeignet, um den Fahrer bei der monotonen Transportaufgabe zu unterstützen und Kollisionen durch Unaufmerksamkeit zu vermeiden.

## **8.2.8 Teleoperierter Betrieb**

Ein Beispiel für den teleoperierten Betrieb eines Fahrladers unter Tage wird in [36] gezeigt. Der Fahrlader wurde dafür an Front und Heck mit Kamerasystemen ausgerüstet (siehe Kap. 8.1.11). Zusammen mit allen relevanten Maschinenparametern würden die Daten an mehrere Daten-Sammelpunkte eines drahtlosen Netzwerks übertragen, die entlang der Strecke verbaut wären. Von dort aus würden sie per Kabel an einen entfernten Bedienerarbeitsplatz weitergeleitet werden. Auf Monitoren bekäme der Fahrer die Kameradaten sowie die Maschinenparameter übersichtlich dargestellt und könnte die notwendigen Fahrbefehle über eine dem Fahrzeugarbeitsplatz nachempfundene Konsole eingeben. Im Falle einer Störung bei der Datenübertragung würde das Fahrzeug automatisch in einen sicheren Zustand überführt werden.

Im Rahmen des vorliegenden Anwendungsfalls ließen sich damit sowohl Stapelfahrzeug als auch der Transportwagen ausrüsten, um diese aus einem entfernten Leitstand heraus betreiben zu können.

### 8.3 Zusammenfassung Systeme

Die nachfolgende Tabelle 3 listet zusammenfassend die zuvor beschriebenen Systeme auf und unterteilt diese in geeignete und ungeeignete Systeme bezogen auf die Kollisionsvermeidung im Einlagerungsbetrieb. Die geeigneten Systeme werden nachfolgend weiter betrachtet und hinsichtlich ihres Sicherheitsgewinns/-verlustes bewertet.

Tabelle 3: Geeignete und ungeeignete Systeme

<b>Geeignete Systeme</b>
Kamerasysteme
Fahrerbeobachtungskamera
Übertragung von LSA-Daten per Nahbereichskommunikation
Übertragung von Fahrzeuginformationen per Nahbereichskommunikation
Optische Markierungen als Positionierhilfe
Hinderniserkennung zur Kollisionsvermeidung
Automatisierte Querführung
Teleoperierter Betrieb
<b>Ungeeignete Systeme</b>
Crash Sensorik
Ampelerkennung per Kamera
Autonome Systeme unter Tage
Systeme zur Stabilisierung der Fahrzeugführung

## 9. Vermeidung der Einfahrt in gesperrte Streckenabschnitte

Die Vermeidung der Einfahrt in gesperrte Streckenabschnitte während des Einlagerungsbetriebs stellt eine der Aufgabenstellungen hinsichtlich der Überprüfung der geplanten Schutzmaßnahmen dar. Gemäß aktueller Planungsgrundlage soll die Freigabe der Einfahrt in die Abschnitte über eine Lichtsignalanlage (siehe Abbildung 6) geregelt werden. Diese erfasst mit Hilfe von Detektoren zunächst das in den Steuerungsbereich der LSA einfahrende Fahrzeug. Im weiteren Ablauf der Verkehrslenkung unter Tage erteilt die LSA weitere Freigaben zum Einfahren in den jeweiligen Streckenabschnitt. Ist der Streckenabschnitt nicht freigegeben, zeigt das Signal Rot. Ein Überfahren des Signals bzw. eine Einfahrt in den falschen Streckenabschnitt wird sensorisch erfasst und der Fahrer wird über stationäre akustische und optische Warngeräte informiert. Gleichzeitig wird eine Meldung über den Rotlicht-Verstoß an den Leitstand abgesetzt.

Weitere Vorsorgemaßnahmen zur Vermeidung der Einfahrt in gesperrte Streckenabschnitte:

- Während des Einlagerungsbetriebes haben mit Transporteinheiten beladene Transportwagen absolute Vorfahrt vor allen anderen Fahrzeugen. Alle Fahrten, die nicht in direktem Zusammenhang mit dem Transport von Abfallgebänden stehen (z. B. Fahrten der Betriebsaufsicht, des Strahlenschutzes sowie Sondereinsätze zur Beseitigung vor

- Betriebsstörungen), sind ausschließlich nach Weisung und unter Leitung des örtlichen Leitstandes im Füllort durchzuführen [6]
- Die Teilstrecke vom Erkennen der LSA bis zum vorgeschriebenen Haltepunkt ist länger als der Bremsweg bei ungünstigsten Fahrbedingungen [6]
  - Der automatische Ablauf eines Signalprogramms startet erst dann, wenn die vorgegebene Route (für TW ist dies die Strecke zwischen Füllort und jeweils zu beliefernder Einlagerungskammer) fahrzeugfrei ist [6].

Dass eine LSA aufgrund einer technischen Störung fehlerhafte Signale anzeigt, ist aufgrund der installierten Selbstprüfung ausgeschlossen. Absichtliche Rotlichtverstöße sind in dem hier gegebenen Kontext anders als im Straßenverkehr nicht zu erwarten. Es handelt sich hier um in dieser besonderen Situation (für Endlagerbetrieb) geschultes Personal, sodass das hier ausgeschlossen ist.

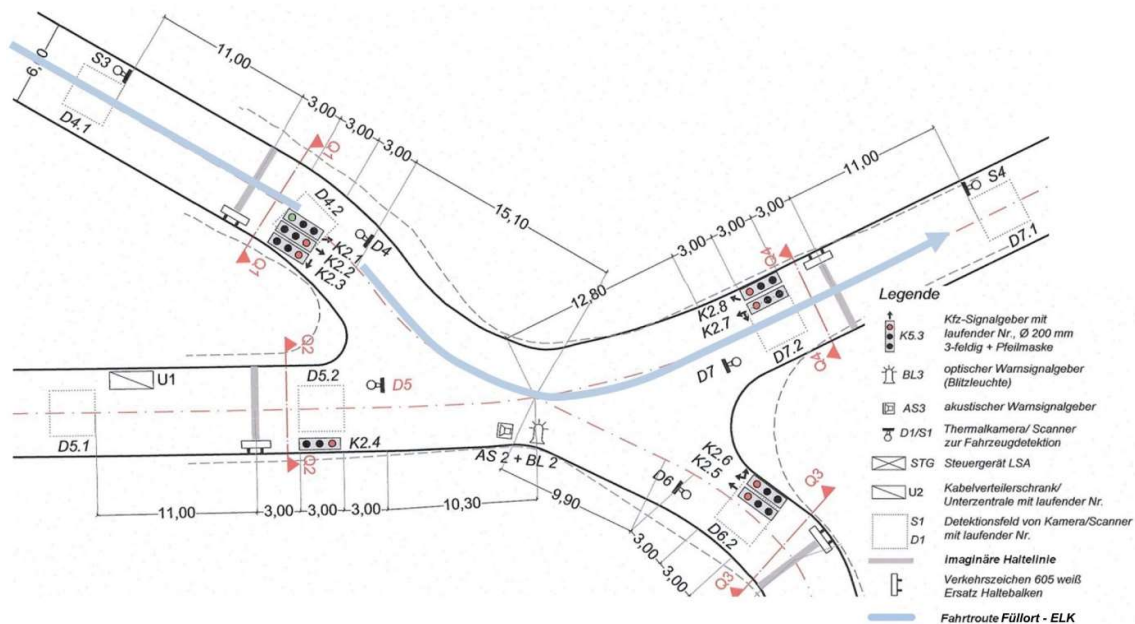


Abbildung 6: Schematische Darstellung LSA

Vor diesem Hintergrund ergeben sich zwei wesentliche Aufgabenstellungen:

- Überprüfung der für das Endlager Konrad geplanten Schutzmaßnahmen zur Vermeidung der Einfahrt von Fahrzeugen in bereits besetzte untertägige Streckenabschnitte
- Ggf. Empfehlung ergänzender Schutzmaßnahmen zur Vermeidung der Einfahrt von Fahrzeugen in bereits besetzte untertägige Streckenabschnitte.



	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 48 von 97
		Stand: 19.02.2025

## 9.1 Vermeiden von Rotlicht-Verstößen im Vorfeld

Um Rotlichtverstöße zu vermeiden, sei an dieser Stelle verwiesen auf den Abschnitt der Fahrerassistenzsysteme und auf das System zur Übertragung von LSA-Daten per Nahbereichskommunikation verwiesen. Dabei würden die aktuell geltenden Signale der LSA per Funk ausgestrahlt und für den Fahrer in der Kabine visuell angezeigt.

Gleichzeitig könnte die Information mit einem Abbiegehinweise verknüpft werden, damit der Fahrer in den richtigen Streckenabschnitt einfährt, vergleichbar mit einer Routenempfehlung eines Navigationssystems.

Kann sich das Fahrzeug hingegen innerhalb seiner Umgebung hinreichend genau lokalisieren, so könnte dem Fahrer auf einer digitalen Navigationskarte eine Routeninformation angezeigt werden. Wäre die Route mit den Daten der LSA verknüpft, so könnte der Fahrer auch auf diese Art über einen Rotlicht-Verstoß bzw. ein fehlerhaftes Einfahren in einen nicht freigegebenen Streckenabschnitt informiert werden.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, die LSA an eine Schrankenanlage zu koppeln und nur denjenigen Abschnitt freizugeben, für den die LSA ein grünes Signal ausgibt. Zudem kann auf den Schranken mittels Leuchten das Lichtsignal der LSA zusätzlich wiedergegeben werden.

## 9.2 Aktives Hindern an einer Weiterfahrt

Wird das Haltesignal missachtet, und die lokalen akustischen und optischen Warnsysteme arbeiten wie vorgesehen, kann eine Weiterfahrt aufgrund von Unaufmerksamkeit nahezu vermieden werden. Die Möglichkeit, dass aufgrund körperlicher Beeinträchtigungen, wie z. B. Ohnmacht, oder aber durch bewusstes Ignorieren des Haltesignals eine Weiterfahrt erfolgt, bleibt bestehen.

Grundsätzlich wird durch das betriebliche Gesundheitsmanagement (entsprechende regelmäßigen Vorsorgeuntersuchungen) des unter Tage tätigen Personals sowie das Bestehen entsprechender betrieblicher Anweisungen für den Einlagerungsbetrieb das Risiko gesundheitlicher Beeinträchtigungen minimiert. Dennoch werden im Sinne von zusätzlichen Optimierungsmaßnahmen hier technische Lösungen untersucht, die das Fahrzeug aktiv an einer Weiterfahrt hindern. Infrastrukturseitig kann dies durch ein mechanisches Versperren des Weges, z. B. durch die beschriebene Schrankenanlage geschehen oder z. B. durch den Einsatz hydraulisch absenkbarer Poller geschehen (siehe Abbildung 7). Der Einsatz einer Schrankenanlage unter Tage im Endlager Konrad ist ungeachtet des hohen Installations- und Wartungsaufwand umsetzbar.

Weiterhin könnte das Fahrzeug durch einen elektronischen Eingriff in die Bremsaktorik zum Stillstand gebracht werden. Dafür wäre eine Funkanbindung notwendig, mit der das Fahrzeug von außen, nach einem Rotlicht-Verstoß, durch Eingriff in die Fahrzeugsteuerung angehalten werden würde. Die Signale könnten durch die LSA selbst oder aber manuell durch den Leitstand generiert werden.





Abbildung 7: Hydraulisch absenkbarer Poller mit LED Signalen im oberen Teil [37]

### 9.3 Bewertung

Die geplanten Schutzmaßnahmen des Endlagers Konrad zur Vermeidung einer Einfahrt in besetzte Streckenabschnitte ist ausreichend. Als potentiell ergänzende Maßnahmen, um die unbeabsichtigte Einfahrt in einen gesperrten Streckenabschnitt zu vermeiden, eignen sich zum einen technische Fahrerassistenzsysteme in den Fahrzeugen und zum anderen infrastrukturelle Maßnahmen wie Schranken. Die Bewertung der Fahrerassistenzsysteme erfolgt in Abschnitt 12.3.

Anstelle der Installation einer Schrankenanlage kommt eine Polleranlage von vornherein nicht in Betracht: Bei einer Kollision mit fest verbauten Pollern birgt das Risiko, dass das Fahrzeug so beschädigt wird, dass eine Weiterfahrt nicht gegeben und eine Bergung des Abfallgebundes vom geschädigten Fahrzeug erforderlich wäre.

Die Schrankenanlage wäre mit geringerem Aufwand an den Knotenpunkten in der Strecke zu installieren und in die Steuerung der LSA zu integrieren. Durch einen Einbau der Schrankenanlagen an den Knotenpunkten, würde die Wahrscheinlichkeit einer unbeabsichtigten Einfahrt in gesperrte Streckenabschnitte zusätzlich minimiert werden, da die Schrankenanlage dem potentiellen abgelenkten Fahrer aktiv ein Hindernis in den Weg stellt, das ggf. eine zusätzliche optische Barriere zur LSA darstellen würde. Somit würde die Sichtbarkeit der Signale der LSA erhöht werden. Im Gegensatz dazu gilt es noch zu betrachten, dass durch die Implementierung der Schrankenanlagen sowie Integrierung in die Steuerung der LSA, Kollisionen zwischen Transportwagen und Schrankenanlage möglich sind. Dies würde dazu führen, dass Kollisionen mit der Schranke selbst zu einem neuen zu betrachtenden Ereignis führen, das jedoch aufgrund der Nachgiebigkeit der Schranke nicht störfallrelevant ist.

Als infrastrukturelle Maßnahme, die eine Einfahrt in gesperrte Streckenabschnitte vermeiden kann, ist eine Schrankenanlage grundsätzlich geeignet. Jedoch kann es im Falle der Implementierung einer Schrankenanlage zu Kollisionen mit der Schranke selbst kommen, so dass hier im Ergebnis kein Sicherheitsgewinn erzielt werden kann.

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 50 von 97
		Stand: 19.02.2025

In den von der BGE zur Verfügung gestellten Unterlagen müssen die bei der Inbetriebsetzung gewonnenen Erkenntnisse verwertet werden (siehe Nebenbestimmung A.4 - 3 des Planfeststellungsbeschlusses). Dazu gehören die Erkenntnisse über die tatsächliche Wirksamkeit der Verkehrsregelung durch Lichtsignalanlagen. Es wird geraten, während der Inbetriebsetzungsphasen die tatsächliche Häufigkeit von Rotlicht-Verstößen zu dokumentieren. Die Dokumentation sollte die Ursache sowie Auswirkung beinhalten. Damit wird auf Basis der gewonnenen Betriebserfahrung eine Beurteilung ermöglicht, ob der Einsatz von Schranken in Erwägung gezogen werden sollte.

## **10. Bewertung des Sicherheitsgewinns**

Die zur Verfügung gestellten Unterlagen (BGE) wurden gesichtet und analysiert. Hierdurch wurde herausgearbeitet, welche Sicherheitssysteme bereits unter Tage verbaut bzw. welche während des Einlagerungsbetriebs (derzeitige Planung) verwendet werden. Durch die Analyse (siehe Kap. 12) wird identifiziert, ob ergänzende Schutzmaßnahmen zu einem signifikanten Sicherheitsgewinn für die Vermeidung von Kollisionen unter Tage führen können, oder ob die bereits getroffenen Schutzmaßnahmen hinreichend sind.

Gemäß dem Verweis im Abschlussbericht [2] wird auf die anlageninternen Ereignisse hingewiesen, welche zur Kollision von Transportmitteln führen können. Diese werden innerhalb der Unterlage [38] identifiziert und nummeriert (siehe Nr. 50, 51, 53, 55, 60, 64, 68 und 78).

Um zu beurteilen, ob nach der Bewertung des Sicherheitsgewinns ein signifikanter Sicherheitsgewinn im hier verstandenen Sinne unter Bezugnahme ergänzender Schutzmaßnahmen erzielt werden kann, wurde die Bewertung anhand einer eigens entwickelten Einstufung durchgeführt. Die Methodik zur Einstufung des Sicherheitsgewinns wird in Kapitel 11 beschrieben. Bei Durchführung der Einstufung des Sicherheitsgewinns wurde die Kontrollierbarkeit (siehe Tabelle 4) bewertet, wobei die bereits bestehenden hinreichenden Schutzmaßnahmen berücksichtigt wurden. Nachfolgend wurde die Kontrollierbarkeit, unter Bezugnahme der ergänzenden Schutzmaßnahmen, erneut bewertet. Die Ergebnisse wurden anschließend verglichen, wobei aus dem Vergleich hervorgeht, ob durch die ergänzenden Schutzmaßnahmen ein Sicherheitsgewinn oder ein signifikanter Sicherheitsgewinn erzielt wurde. Die Ergebnisse der Bewertung werden in Kapitel 12 dargestellt.

Grundsätzlich standen zur Bewertung der Signifikanz und somit zur Bewertung des Sicherheitsgewinns nur im geringen Maße Bewertungsparameter zur Verfügung [11]. Aus diesem Grund wird empfohlen, Sicherheitssysteme, für die ein Sicherheitsgewinn identifiziert wurde, ein Mehrwert in der Praxis jedoch nicht für alle Fahrzeuge und in jeder Fahrsituationen gegeben ist, auf einen möglichen Sicherheitsgewinn des Systems unter betriebsnahen Bedingungen weiter zu untersuchen. Durch die Analyse des möglichen Sicherheitsgewinns, können sich weitere, zur Bewertung der Signifikanz, erforderliche Parameter ergeben, wodurch eine abschließende Aussage, hinsichtlich der Signifikanz, der in Kapitel 12 mit einem Sicherheitsgewinn identifizierten Fahrerassistenzsysteme getätigt werden kann.

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 51 von 97
		Stand: 19.02.2025

## 11. Methodikbeschreibung zur Einstufung des Sicherheitsgewinns

Um zu identifizieren, ob ein signifikanter Sicherheitsgewinn durch Fahrerassistenzsysteme oder autonome Systeme erzielt wird, wird nachfolgend die Methodik zur Einstufung des Sicherheitsgewinns dargelegt.

Hierzu wurde das jeweilige potentiell gefährliche Ereignis betrachtet, wobei sich alle betrachteten Ereignisse aus den bereits identifizierten Ereignissen ableiten lassen [38]. Zusätzlich wurden jeweilig zum identifizierten Ereignis, der Betriebsbereich sowie der auslösende Vorgang innerhalb des Ereignisses betrachtet (Tabelle 4).

Die Einstufung des Sicherheitsgewinns wurde im Wege eines Vergleichs der vorhandenen Schutzmaßnahmen, die die Sicherheit des Endlagers Konrad bereits hinreichend gewährleisten, und möglichen weiteren möglichen Schutzmaßnahmen vorgenommen. Hierbei wurde auf Grundlage der ISO 26262:2018 „Road vehicles – Functional safety“ sowie der IEC 61508-5:2010 „Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 5“ ein Ansatz hergeleitet, welcher die in der ISO 26262:2018 definierten Parameter „S“ (Severity), „E“ (Exposure) und „C“ (Controllability) berücksichtigt. Die Bewertung der Kontrollierbarkeit ist eine Einschätzung der Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrzeugführer in der Lage ist eine ausreichende Kontrolle über das gefährliche Ereignis zu erlangen, so dass dieser den spezifischen Schaden vermeiden kann. Da Kollisionen mit beladenen Fahrzeugen grundsätzlich vermieden werden müssen, wurde die Eintrittswahrscheinlichkeit (E = Exposure) als zu betrachtenden Parameter nicht berücksichtigt. Ebenso wurde der Parameter des Schadensausmaßes (S = Severity) im weiteren Verlauf nicht weiter betrachtet, da jegliche Kollisionen, in denen eine Beschädigung der Abfallbinde nicht ausgeschlossen werden kann, vermieden werden müssen und die Exposition des Betriebspersonals in den betrachteten Szenarien nicht berücksichtigt wird. Um dem hier gewählten Anwendungszweck zu entsprechen, wurde für die weitere Einstufung des Sicherheitsgewinns ausschließlich der Parameter "C" zur Bestimmung der Kontrollierbarkeit verwendet. Hierbei wurden Fahrfehler, wie zum Beispiel menschliches Versagen oder Unaufmerksamkeit des Fahrzeugführers sowie das Eintreten eines technischen Defekts am Transportwagen, Stapelfahrzeug oder an der Verkehrsregeleinrichtung berücksichtigt. Weitere Randbedingungen, welche zur Bewertung berücksichtigt wurden, lassen sich aus Kapitel 3 entnehmen. Lässt sich aus einer ergänzenden Schutzmaßnahme, im Vergleich zu der bestehenden Schutzmaßnahme, eine Verbesserung der Kontrollierbarkeit identifizieren, führt diese Schutzmaßnahme im weiteren Betrachtungsfall zu einem Sicherheitsgewinn. Bleibt die Kontrollierbarkeit nach Einsatz der ergänzenden weiteren Schutzmaßnahme im jeweiligen Betrachtungsfall gleich oder verschlechtert sich, führt dies entweder zu keinem Sicherheitsgewinn oder gar zu einem Sicherheitsverlust. Ergibt sich abschließend, dass die weitere Kontrollierbarkeit nach Einsatz der ergänzenden Schutzmaßnahme als grundsätzlich kontrollierbar eingestuft wird, wird der Sicherheitsgewinn als signifikant eingestuft. Aufgrund der technologiebedingten Unterschiede sowie fehlender ausreichender Betriebserfahrung lässt sich kein allgemeingültiger Bewertungsmaßstab zur Identifizierung von Systemen mit signifikantem Sicherheitsgewinn festlegen. Daher wurde der Sicherheitsgewinn unter Berücksichtigung der Kontrollierbarkeit, basierend auf Expertenmeinung, qualitativ bewertet.

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 52 von 97
		Stand: 19.02.2025

Für jedes in Kapitel 12 betrachtete Fahrerassistenzsystem wird eine abschließende Aussage getroffen, ob durch Implementierung des jeweiligen Systems ein signifikanter Sicherheitsgewinn erzielt werden kann. Eine abschließende Bewertung (unter Einbeziehung von Faktoren zur Umsetzbarkeit und Aufwand), ob dieses System zu empfehlen ist, erfolgt in Kapitel 13.

## **12. Bewertung des Sicherheitsgewinns für die geeigneten Systeme**

Innerhalb der nachfolgenden Kapitel wird die Bewertung des Sicherheitsgewinns für die in Kapitel 8 identifizierten, prinzipiell geeigneten Systeme durchgeführt. Die Bewertung basiert ebenfalls auf den in Kapitel 3 aufgeführten allgemeinen Randbedingungen.

In der nachfolgenden Tabelle 4 sind die betrachteten, anlageninternen Ereignisse (siehe [38]) dargestellt. In den anschließenden Kapiteln zur Bewertung des Sicherheitsgewinns wurden die anlageninternen Ereignisse den betrachteten Fahrsituationen zugeordnet.

Tabelle 4: Betrachtete anlageninterne Ereignisse aus der Störfallanalyse

Nr.	Betriebsbereich / Vorgang	Ereignis	Auslösender Vorgang
50	Füllort, (Beladen des Transportwagens)	Kollision mit Transportmittel	Technischer Defekt oder Fahrfehler
51	Transportstrecke (Transport Abfallgebinde)	Kollision TW mit Transportmittel	Verkehrsregeleinrichtung defekt
53	Transportstrecke (Transport Abfallgebinde)	Kollision TW mit Stoß	Fahrfehler oder Wagen defekt
55	Transportstrecke (Transport Abfallgebinde)	Kollision TW mit Stoß	Bremse defekt auf Rampe
60	Entladekammer (Entladen TW)	Kollision TW und Stapelfahrzeug	Technischer Defekt oder Fahrfehler
64	Entladekammer (Entladen TW)	TW oder Stapelfahrzeug kollidiert mit Stoß, Abfallgebänden	Technischer Defekt oder Fahrfehler
68	Einlagerungskammer (Transport Abfallgebinde)	Kollision Stapelfahrzeug mit Stoß	Technischer Defekt oder Fahrfehler
78	Einlagerungskammer (Einlagerung Abfallgebinde)	Kollision Transportmittel (Stapelfahrzeug) mit Abfallgebinde	Technischer Defekt oder Fahrfehler

Die oben aufgeführten anlageninternen Ereignisse aus der Störfallanalyse [38] führen nicht zu einem Brand. Im Rahmen der Störfallanalyse sind auch anlageninterne Ereignisse mit Brand betrachtet worden. Das Ereignis Brand ist eine Folge der Kollision und daher als Nachfolgeereignis anzusehen. Wird eine Kollision mit einem Hindernis verhindert oder deren Auswirkung vermindert, so wird auch der Brand verhindert. Zu den anlageninternen Ereignissen aus der Störfallanalyse mit anschließendem Brand zählen die in der nachfolgenden Tabelle 5 aufgeführten Punkte. Den Störfällen mit Brand wird jeweils der Störfall ohne Brandereignis zugeordnet, durch den das Ereignis in Bezug auf die Kollision abgedeckt wird.

Tabelle 5: Zuordnung der Störfälle mit und ohne Brandereignis gemäß Störfallanalyse [38]

<b>Störfall: Kollision mit Brand</b>	<b>Ereignis</b>	<b>Abgedeckt durch Störfall: Kollision ohne Brand</b>
47	Kollision TW mit Hindernis	50
52	Kollision TW mit Transportmittel	51
54	Kollision TW mit Stoß	53
61	Kollision TW mit Stapelfahrzeug	60
65	Kollision TW mit Stoß	64
69	Kollision Stapelfahrzeug kollidiert mit Stoß, Abfallgebinden	68
77	Kollision Transportmittel	68, 78 (Sonderfall, aber Störfall vergleichbar mit 69 bzw. 79)
79	Kollision Transportmittel (Stapelfahrzeug) mit Abfallgebinde	78

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 55 von 97
		Stand: 19.02.2025

## **12.1 Kamerasysteme**

Die Beschreibung des Systems erfolgt unter Abschnitt 8.2.1.

### **12.1.1 Fahrerassistenzsystem zur Umfeldvisualisierung durch Fahrzeugkameras**

Die Transportwagen oder Stapelfahrzeuge würden mit Kameras ausgestattet werden, um für den Fahrer schwer einsehbare Bereiche (z. B. beim Rangieren, Abbiegen, Rückwärtsfahren [nur unbeladene TW]) besser zu erfassen. Die Bilddaten verschiedener Kameras würden auf einem Monitor in der Fahrerkabine visualisiert werden.

Durch die erhöhte Einsehbarkeit in die direkte Fahrzeugumgebung könnte der Fahrzeugführer andere Fahrzeuge oder stationäre Objekte frühzeitig erkennen und somit die Gefahr einer Kollision weiter verringern. Hierdurch kann die Kontrollierbarkeit erhöht und ein **Sicherheitsgewinn** erzielt werden.

Tabelle 6: Bewertung: Umfeldvisualisierung durch Fahrzeugkameras

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
Transportwagen fährt geradeaus  Nr. 50, 51, 53, 55, 60, 64	In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Visualisierung von Kamerabildern in der Fahrerkabine <b>kein Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da bei Geradeausfahrt sowie der Fahrt auf einer Rampe keine erhöhte Einsehbarkeit durch in Fahrtrichtung gerichtete Kameras erzeugt werden würde.
Transportwagen fährt über Rampe  Nr. 53, 55	Durch die Beobachtung des Kamerabildes auf dem Monitor bei Geradeausfahrt würde zudem ein <b>Sicherheitsverlust</b> entstehen, da der Fahrer seinen direkten Blick von der Fahrbahn abwenden müsste.
Transportwagen fährt Kurve  Nr. 50, 51, 53, 60, 64	In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Visualisierung von Kamerabildern in der Fahrerkabine <b>kein Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da bei Kurvenfahrt sowie bei Fahrt von der Entladekammer zur Einlagerungskammer keine erhöhte Einsehbarkeit durch in Fahrtrichtung gerichtete Kameras erzeugt werden würde.
Stapelfahrzeug fährt aus der Entladekammer in die Einlagerungskammer  Nr. 68	Durch die Beobachtung des Kamerabildes auf dem Monitor bei Kurvenfahrt sowie bei Fahrt von der Entladekammer zur Einlagerungskammer würde zudem ein <b>Sicherheitsverlust</b> entstehen, da der Fahrer seinen direkten Blick von der Fahrbahn abwenden würde und eine erhöhte Einsehbarkeit durch Fahrzeugkameras nicht gegeben wäre.
Transportwagen passiert Knotenpunkte  Nr. 50, 51, 53	In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Visualisierung von Kamerabildern in der Fahrerkabine <b>kein Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da bei einem Passieren von Knotenpunkten keine erhöhte Einsehbarkeit durch in Fahrtrichtung gerichtete Kameras erzeugt werden würde. Durch die Kameras könnte ein Defekt der LSA nicht erkannt werden und bei Abbiegevorgängen würden die in Fahrtrichtung gerichteten Kameras keinen ausschlaggebenden Mehrwert bringen.  Durch die Beobachtung des Kamerabildes auf dem Monitor beim Passieren von Knotenpunkten würde zudem ein <b>Sicherheitsverlust</b> entstehen, da der Fahrer seinen direkten Blick von der Fahrbahn abwenden würde und eine erhöhte Einsehbarkeit durch Fahrzeugkameras nicht gegeben wäre.



Tabelle 6: Bewertung: Umfeldvisualisierung durch Fahrzeugkameras (Forts.)

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
<p>Stapelfahrzeug entlädt den Transportwagen in der Entladekammer</p> <p>Nr. 60, 64</p>	<p>In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Visualisierung von Kamerabildern in den Fahrerkabinen ein <b>Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da beim Entladen des Transportwagens in der Entladekammer eine erhöhte Einsehbarkeit durch in Fahrtrichtung gerichteten Kameras erzeugt würde. Beim Anfahren an den Transportwagen und Rangieren in der Entladekammer würde durch die Kameras eine erhöhte Einsehbarkeit in die Fahrzeugumgebung erzielt.</p> <p>Zur Einsicht in die Entladekammer sind an dem der Kammer gegenüberliegenden Stoß zu beiden Richtungen Verkehrsspiegel angebracht, wodurch die Einsehbarkeit in schwer einsehbare Bereiche erhöht wird.</p> <p>Das Stapelfahrzeug (aktueller Planungsstand) ist mit insgesamt acht Kameras ausgestattet, welche die Verriegelung von Containern, die Gabelzinken sowie den Spreader und die Spitzen der Gabelzinken erfassen und visuell überwachen. Der Stapelfahrer hat zu jeder Zeit die Möglichkeit, sich die Bilder der Kameras in der Fahrerkabine anzeigen zu lassen. Zudem sind am Stapelfahrzeug weitere verschiedene Sensoren zur Überwachung von Einstellungen und Zuständen verbaut (z. B. Überwachung der Hubmaststellung durch Wegemesssystem (WMS), Überwachung des Spreader-Schwenkwinkels durch WMS, Überwachung bei der Aufnahme von Lasten/der Gabelzinken durch Näherungsschalter und Ultraschallsensoren, Überwachung der Fahrgeschwindigkeit).</p>

Tabelle 6: Bewertung: Umfeldvisualisierung durch Fahrzeugkameras (Forts.)

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
<p>Stapelfahrzeug entlädt das Abfallgebände in der Einlagerungskammer</p> <p>Nr. 78</p>	<p>In dem betrachteten anlageninternen Ereignis würde durch die Visualisierung von Kamerabildern in der Fahrerkabine ein <b>Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da beim Entladen der Abfallgebände in der Einlagerungskammer eine erhöhte Einsehbarkeit durch in Fahrtrichtung gerichtete Kameras erzeugt werden würde. Beim Rangieren in der Einlagerungskammer würde durch die Kameras eine erhöhte Einsehbarkeit in die Fahrzeugumgebung erzielt werden.</p> <p>Das Stapelfahrzeug ist mit insgesamt acht Kameras ausgestattet, welche die Verriegelung von Containern, die Gabelzinken sowie den Spreader und die Spitzen der Gabelzinken erfassen und visuell überwachen. Der Stapelfahrer hat zu jeder Zeit die Möglichkeit, sich die Bilder der Kameras in der Fahrerkabine anzeigen zu lassen. Zudem sind am Stapelfahrzeug weitere verschiedene Sensoren zur Überwachung von Einstellungen und Zuständen verbaut (z. B. Überwachung der Hubmaststellung durch Wegemesssystem (WMS), Überwachung des Spreader-Schenkwinkels durch WMS, Überwachung bei der Aufnahme von Lasten/der Gabelzinken durch Näherungsschalter und Ultraschallsensoren, Überwachung der Fahrgeschwindigkeit).</p>

**Signifikanter Sicherheitsgewinn:**

Durch Integration von Fahrzeugkameras zur Umfeldvisualisierung am Transportwagen sowie am Stapelfahrzeug würde **kein signifikanter Sicherheitsgewinn** erzielt, da durch die bereits bestehenden Schutzmaßnahmen, wie z. B. die Anbringung von Verkehrsspiegeln in der Entladekammer und die Anbringung von acht Kameras am Stapelfahrzeug, für eine bessere Umfeldvisualisierung sorgen und keine wahrnehmbare Verbesserung der Sicherheit in der Praxis erzielt werden würde. Die Integration von Fahrzeugkameras würde zudem keine Kollision durch Fahrfehler oder einen technischen Defekt verhindern.

### 12.1.2 Fahrerassistenzsystem zur Umfeldvisualisierung durch fahrzeugexterne Kameras

Ortsfeste Kameras würden an schwer einsehbaren Bereichen und Bereichen mit komplexen Fahrsituationen, z. B. am Füllort oder in den Einlagerungskammern, montiert werden, um diese Bereiche für den Fahrer (z. B. beim Rangieren, Abbiegen, Rückwärtsfahren) besser erfassen zu können. Die Bilddaten würden mittels Funkeinrichtung im Nahbereich auf einem Monitor in das Fahrzeug, oder den Leitstand (am Füllort) übertragen werden.

Durch die erhöhte Einsehbarkeit an schwer einsehbaren Bereichen in die direkte Fahrzeugumgebung könnte der Fahrzeugführer andere Fahrzeuge oder stationäre Objekte frühzeitiger erkennen und somit Kollisionen vermeiden. Hierdurch könnte die Kontrollierbarkeit erhöht und ein **Sicherheitsgewinn** erzielt werden.

Tabelle 7: Bewertung: Umfeldvisualisierung durch fahrzeugexterne Kameras

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
Transportwagen fährt geradeaus Nr. 50, 51, 53, 55, 60, 64	In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Visualisierung von Kamerabildern in der Fahrerkabine <b>kein Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da gerade Streckenabschnitte keine schwer einsehbaren Bereiche darstellen und daher keine Kameras montiert würden.
Transportwagen fährt über Rampe Nr. 53, 55	Durch die Beobachtung des Kamerabildes auf dem Monitor bei Geradeausfahrt in der Einlagerungskammer (Ereignisse 60 und 64) würde zudem ein <b>Sicherheitsverlust</b> entstehen, da der Fahrer seinen direkten Blick von der Fahrbahn abwenden würde.
Transportwagen fährt Kurve Nr. 50, 51, 53, 60, 64	In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Visualisierung von Kamerabildern in der Fahrerkabine <b>kein Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da bei Kurvenfahrt sowie bei Fahrt von der Entladekammer zur Einlagerungskammer keine fahrzeugexternen Kameras montiert wären und somit keine erhöhte Einsehbarkeit erzeugt würde.
Stapelfahrzeug fährt von der Entladekammer zur Einlagerungskammer Nr. 68	
Transportwagen passiert Knotenpunkte Nr. 50, 51, 53	In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Visualisierung von Kamerabildern in der Fahrerkabine <b>kein Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da an Knotenpunkten keine fahrzeugexternen Kameras angebracht wären. Somit würde keine erhöhte Einsehbarkeit erzeugt. Durch die Kameras könnte ein Defekt der LSA nicht erkannt werden.

Tabelle 7: Bewertung: Umfeldvisualisierung durch fahrzeugexterne Kameras (Forts.)

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
<p>Stapelfahrzeug entlädt den Transportwagen in der Entladekammer</p> <p>Nr. 60, 64</p>	<p>In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Visualisierung von Kamerabildern in den Fahrerkabinen ein <b>Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da beim Entladen des Transportwagens in der Entladekammer eine erhöhte Einsehbarkeit durch fahrzeugexterne Kameras erzeugt würde. Beim Anfahren an den Transportwagen und Rangieren in der Entladekammer würde durch die Kameras eine erhöhte Einsehbarkeit in die Fahrzeugumgebung erzielt.</p> <p>Zur Einsicht in die Entladekammer sind an dem der Kammer gegenüberliegenden Stoß zu beiden Richtungen Verkehrsspiegel angebracht, wodurch die Einsehbarkeit in schwer einsehbare Bereiche erhöht wird. Das Stapelfahrzeug ist mit insgesamt acht Kameras ausgestattet, welche die Verriegelung von Containern, die Gabelzinken sowie den Spreader und die Spitzen der Gabelzinken erfassen und visuell überwachen. Der Fahrer des Stapelfahrzeuges hat zu jeder Zeit die Möglichkeit, sich die Bilder der Kameras in der Fahrerkabine anzeigen zu lassen. Zudem sind am Stapelfahrzeug weitere verschiedene Sensoren zur Überwachung von Einstellungen und Zuständen verbaut (z. B. Überwachung der Hubmaststellung durch Wegemesssystem (WMS), Überwachung des Spreader-Schenkels durch WMS, Überwachung bei der Aufnahme von Lasten/der Gabelzinken durch Näherungsschalter und Ultraschallsensoren, Überwachung der Fahrgeschwindigkeit).</p>

Tabelle 7: Bewertung: Umfeldvisualisierung durch fahrzeugexterne Kameras (Forts.)

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
<p>Stapelfahrzeug entlädt das Abfallgebände in der Einlagerungskammer</p> <p>Nr. 78</p>	<p>In dem betrachteten anlageninternen Ereignis würde durch die Visualisierung von Kamerabildern in der Fahrerkabine ein <b>Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da beim Entladen der Abfallgebände in der Einlagerungskammer eine erhöhte Einsehbarkeit durch fahrzeugexterne Kameras erzeugt würde. Beim Rangieren in der Einlagerungskammer würde durch die Kameras eine erhöhte Einsehbarkeit in die Fahrzeugumgebung erzielt werden.</p> <p>Das Stapelfahrzeug ist mit insgesamt acht Kameras ausgestattet, welche die Verriegelung von Containern, die Gabelzinken sowie den Spreader und die Spitzen der Gabelzinken erfassen und visuell überwachen. Der Stapelfahrer hat zu jeder Zeit die Möglichkeit, sich die Bilder der Kameras in der Fahrerkabine anzeigen zu lassen. Zudem sind am Stapelfahrzeug weitere verschiedene Sensoren zur Überwachung von Einstellungen und Zuständen verbaut (z. B. Überwachung der Hubmaststellung durch Wegemesssystem (WMS), Überwachung des Spreader-Schenkwinkels durch WMS, Überwachung bei der Aufnahme von Lasten/der Gabelzinken durch Näherungsschalter und Ultraschallsensoren, Überwachung der Fahrgeschwindigkeit).</p>

**Signifikanter Sicherheitsgewinn:**

Durch Integration von fahrzeugexternen Kameras zur Umfeldvisualisierung würde **kein signifikanter Sicherheitsgewinn** erzielt, da zusätzlich zu den bereits bestehenden Schutzmaßnahmen, wie die Anbringung von Verkehrsspiegeln in der Entladekammer sowie der acht bereits vorhandenen Kameras im Stapelfahrzeug, welche für eine bessere Umfeldvisualisierung sorgen, keine wahrnehmbare Verbesserung der Sicherheit in der Praxis erzielt werden würde. Die Integration von fahrzeugexternen Kameras würde zudem keine Kollision durch Fahrfehler oder durch einen technischen Defekt verhindern. Zudem müsste eine regelmäßige Reinigung und Wartung fahrzeugexterner Kameras (in Einbaulage) sichergestellt werden.

## 12.2 Fahrerüberwachung

Die Beschreibung des Systems erfolgt unter Abschnitt 8.2.2.

### 12.2.1 Fahrerassistenzsystem zur Fahrerüberwachung durch Fahrerbeobachtungskamera

Innerhalb der Fahrzeugkabine würde eine Fahrerbeobachtungskamera verbaut werden, welche Fahrerbewegungen, den Lidschlagreflex und den Blickwinkel des Fahrers erkennen würde, um auf den Fahrerszustand bzw. etwaige Ablenkungen schließen zu können. Somit könnte eine längerfristige Unaufmerksamkeit erkannt werden und eine akustische sowie optische Warnung an den Fahrer erfolgen.

Bei ausbleibender Reaktion des Fahrers (z. B.  $t = 10$  s) würde der Entzug der Fahrfreigabe erfolgen und das Fahrzeug würde in einen sicheren Betriebszustand überführt. Zusätzlich würde eine Warnmeldung über den Grubenfunk abgesetzt.

Durch die Fahrerüberwachung könnten Fahrfehler durch längerfristige Unaufmerksamkeit reduziert werden. Kollisionen bedingt durch längerfristige Unaufmerksamkeiten würden durch das System und das Eingreifen in das aktive Fahrgeschehen vermindert werden. Hierdurch könnte die Kontrollierbarkeit erhöht und ein **Sicherheitsgewinn** erzielt werden.

Tabelle 8: Bewertung: Fahrerüberwachung durch Fahrerbeobachtungskamera

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
Transportwagen fährt geradeaus Nr. 50, 51, 53, 55, 60, 64	In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch Fahrerüberwachung mit Hilfe einer Fahrerbeobachtungskamera ein Sicherheitsgewinn entstehen, da Kollisionen mit dem Stoß, Transportmitteln oder Tauschpaletten (z. B. durch Ablenkung oder Unaufmerksamkeit des Fahrers) durch die Fahrerüberwachung und Warnung des Systems bei Erkennen sowie Eingreifen des Systems in die Fahrdynamik bei Nichteingreifen des Fahrers vermieden werden.
Transportwagen fährt über Rampe Nr. 53, 55	In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch einen auslösenden technischen Defekt (z. B. defektes Bremssystem) kein Sicherheitsgewinn entstehen, da das System diesen nicht selbstständig erkennen und daraus resultierende Kollisionen nicht verhindern würde.
Transportwagen fährt Kurve Nr. 50, 51, 53, 60, 64	

Tabelle 8: Bewertung: Fahrerüberwachung durch Fahrerbeobachtungskamera (Forts.)

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
<p>Transportwagen passiert Knotenpunkte</p> <p>Nr. 50, 51, 53</p>	<p>In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch Fahrerüberwachung mit Hilfe einer Fahrerbeobachtungskamera <b>kein Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da eine defekte LSA durch das System nicht erkannt würde und bei Abbiegevorgängen kurzfristige Unaufmerksamkeiten nicht sicher erkannt würden. Kollisionen mit dem Stoß oder Transportmitteln (z. B. durch Ablenkung oder Unaufmerksamkeit des Fahrers) würden demnach nicht rechtzeitig erkannt.</p> <p>Bei einem auslösenden technischen Defekt (z. B. defektes Bremssystem) würde <b>kein Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da das System diesen nicht selbstständig erkennen und daraus resultierende Kollisionen nicht verhindern würde.</p>
<p>Stapelfahrzeug entlädt den Transportwagen in der Entladekammer</p> <p>Nr. 60, 64</p>	<p>In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch Fahrerüberwachung mit Hilfe einer Fahrerbeobachtungskamera <b>kein Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da beim Rangieren in der Entladekammer durch die Fahrerüberwachung, kurzfristige Unaufmerksamkeiten nicht sicher erkannt und Kollisionen mit Transportmitteln, dem Stoß, Tauschpaletten oder Abfallgebinden nicht verhindert würden.</p> <p>Bei einem auslösenden technischen Defekt (z. B. defektes Bremssystem) würde <b>kein Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da das System diesen nicht selbstständig erkennen und daraus resultierende Kollisionen nicht verhindern würden.</p>
<p>Stapelfahrzeug fährt aus der Entladekammer in die Einlagekammer</p> <p>Nr. 68</p>	<p>Im betrachteten anlageninternen Ereignis würde durch Fahrerüberwachung mit Hilfe einer Fahrerbeobachtungskamera ein <b>Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da Kollisionen mit dem Stoß, Transportmitteln oder Tauschpaletten (z. B. durch Ablenkung oder Unaufmerksamkeit des Fahrers) durch die Fahrerüberwachung und Warnung des Systems bei Erkennen sowie Eingreifen des Systems in die Fahrdynamik bei Nichteingreifen des Fahrers, vermieden würden.</p> <p>Bei einem auslösenden technischen Defekt (z. B. defektes Bremssystem) würde <b>kein Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da das System diesen nicht selbstständig erkennen und daraus resultierende Kollisionen nicht verhindern würden.</p>

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 64 von 97
		Stand: 19.02.2025

Tabelle 8: Bewertung: Fahrerüberwachung durch Fahrerbeobachtungskamera (Forts.)

<p>Stapelfahrzeug entlädt das Abfallgebände in der Einlagerungskammer</p> <p>Nr. 78</p>	<p>Im betrachteten anlageninternen Ereignis würde durch Fahrerüberwachung mit Hilfe einer Fahrerbeobachtungskamera kein <b>Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da beim Rangieren in der Einlagerungskammer durch die Fahrerüberwachung, kurzfristige Unaufmerksamkeiten nicht sicher erkannt und Kollisionen mit Transportmitteln, dem Stoß, Tauschpaletten oder Abfallgebänden nicht verhindert würden.</p> <p>Bei einem auslösenden technischen Defekt (z. B. defektes Bremssystem) würde <b>kein Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da das System diesen nicht selbstständig erkennen und daraus resultierende Kollisionen nicht verhindern würde.</p>
---	--

**Signifikanter Sicherheitsgewinn:**

Durch Integration einer Fahrerbeobachtungskamera zur Fahrerüberwachung würde **kein signifikanter Sicherheitsgewinn** erzielt, da Unaufmerksamkeiten zwar erkannt würden, kurzfristige Unaufmerksamkeiten jedoch nicht. Dadurch würden Kollisionen aufgrund von kurzfristigen Fahrfehlern nicht vermieden. Durch das System würden defekte Verkehrsregelrichtungen sowie technische Defekte an den Fahrzeugen nicht erkannt und daraus resultierende Kollisionen nicht verhindert. Die Integration einer Fahrerbeobachtungskamera würde somit lediglich auf längeren Geraden zu einem **Sicherheitsgewinn** führen und es wird keine wahrnehmbare Verbesserung der Sicherheit in der Praxis erwartet.

## 12.3 Übertragung von LSA-Daten per Nahbereichskommunikation

Die Beschreibung des Systems erfolgt unter Abschnitt 8.2.3.

### 12.3.1 Fahrerassistenzsystem zum Nahbereichs-Datenaustausch per Funk durch Meldung von Lichtsignalanlagen

Innerhalb der Fahrzeugkabine wäre ein Monitor verbaut, welcher den aktuellen Status (LSA-Daten), unter Berücksichtigung der aktuellen Fahrtrichtung per Nahbereichsfunk (WPAN), anzeigen würde. Bei einem Rotsignal würde die Geschwindigkeit vom Fahrzeugsteuergerät abgefragt und geprüft, ob ein rechtzeitiges Anhalten möglich ist und gegebenenfalls ein akustisches sowie optisches Warnsignal an den Fahrer ausgegeben. Würde ein Rotsignal dennoch überfahren werden, würde an alle umliegenden Fahrzeuge ein „Halt-Befehl“ abgesetzt und dem Fahrer wird eine Aufforderung zum Halten auf seinem Monitor angezeigt.

Durch die Übertragung des aktuellen Status der LSA in die Fahrerkabine könnte die Kontrollierbarkeit in bestimmten Situationen erhöht und daraus resultierende Kollisionen reduziert werden. Hierdurch könnte ein **Sicherheitsgewinn** erzielt werden.



Tabelle 9: Bewertung: Nahbereichsdatenaustausch per Funk durch Meldung von Lichtsignalanlagen

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
Transportwagen fährt geradeaus  Nr. 50, 51, 53, 55, 60, 64	In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Visualisierung des Status (LSA-Daten) in die Fahrerkabine ein <b>Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da Kollisionen mit entgegenfahrenden Fahrzeugen bei Überfahren eines Rotsignals (z. B. Unaufmerksamkeit) durch das System vermieden würden.
Transportwagen fährt über Rampe  Nr. 53, 55	In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Visualisierung des Status (LSA-Daten) in die Fahrerkabine <b>kein Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da Kollisionen mit dem Stoß, Tauschpaletten oder Abfallgebinden nicht vermieden würden.
Transportwagen fährt Kurve  Nr. 50, 51, 53, 60, 64	<p><b>Kein Sicherheitsgewinn</b> bei einem technischen Defekt (z. B. defektes Bremssystem) am Transportwagen, da das System diesen nicht selbstständig erkennen und das System für die Vermeidung von Kollisionen durch technischen Defekt keinen Mehrwert bringen würde.</p> <p>Durch die Beobachtung des Monitors bei Geradeausfahrt, Kurvenfahrten sowie der Fahrt von der Entladekammer zur Einlagerungskammer, würde ein <b>Sicherheitsverlust</b> entstehen, da der Fahrer seinen direkten Blick von der Fahrbahn abwenden würde.</p>

Tabelle 9: Bewertung: Nahbereichsdatenaustausch per Funk durch Meldung von Lichtsignalanlagen (Forts.)

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
<p>Transportwagen passiert Knotenpunkte Nr. 50, 51, 53</p>	<p>In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Visualisierung des Status (LSA-Daten) in die Fahrerkabine ein <b>Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da Kollisionen mit entgegenfahrenden Fahrzeugen bei Überfahren eines Rotsignals (z. B. Unaufmerksamkeit, widrige Sichtbedingungen) durch das System vermieden würde.</p> <p>Innerhalb von Abbiegevorgängen würde ein <b>Sicherheitsgewinn</b> durch Anzeige der LSA-Daten auf einem Monitor erzielt werden, da entsprechende Warnungen an alle Fahrzeuge ausgegeben würden, falls ein Fahrzeug ein Rotsignal überfährt. Kollisionen von sich kreuzenden Fahrzeugen würden vermieden. Ein technischer Defekt der Verkehrsregeleinrichtung würde vom System erkannt und die Visualisierung des Status (LSA-Daten) in der Fahrerkabine bliebe für den Fahrer bestehen.</p> <p><b>Kein Sicherheitsgewinn</b> bei einem technischen Defekt (z. B. defektes Bremssystem) am Transportwagen, da das System diesen nicht selbstständig erkennen und das System für die Vermeidung von Kollisionen durch technischen Defekt keinen Mehrwert bringen würde.</p> <p>Durch die Beobachtung des Monitors beim Passieren von Knotenpunkten, würde ein Sicherheitsverlust entstehen, da der Fahrer seinen direkten Blick von der Fahrbahn abwenden würde.</p>

Tabelle 9: Bewertung: Nahbereichsdatenaustausch per Funk durch Meldung von Lichtsignalanlagen (Forts.)

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
<p>Stapelfahrzeug entlädt den Transportwagen in der Entladekammer</p> <p>Nr. 60, 64</p>	<p>In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Visualisierung des Status (LSA-Daten) in die Fahrerkabine ein <b>Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da Kollisionen zwischen Stapelfahrzeug und Transportwagen, bei Überfahren eines Rotsignals durch den Transportwagen (z. B. Unaufmerksamkeit, widrige Sichtbedingungen), durch das System vermieden würde.</p> <p>Kollisionen mit dem Stoß, Tauschpaletten oder Abfallgebinden, würden durch das System nicht verhindert, wodurch <b>kein Sicherheitsgewinn</b> erzielt würde. Ebenso würden technische Defekte (z. B. defektes Bremssystem) vom System nicht erkannt und daraus resultierende Kollisionen nicht verhindert werden.</p> <p>Zur Einsicht in die Entladekammer sind an dem der Kammer gegenüberliegenden Stoß zu beiden Richtungen Verkehrsspiegel angebracht und der Transportwagen muss an der Haltelinie anhalten, bis das Stapelfahrzeug seine Position in der Entladekammer eingenommen hat.</p>
<p>Stapelfahrzeug fährt aus der Entladekammer in die Einlagekammer</p> <p>Nr. 68</p>	<p>Im betrachteten anlageninternen Ereignis würde durch die Visualisierung des Status (LSA-Daten) in die Fahrerkabine <b>kein Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da innerhalb dieser Streckenabschnitte, keine LSA verbaut sind.</p>
<p>Stapelfahrzeug entlädt das Abfallgebände in der Einlagekammer</p> <p>Nr. 78</p>	

**Signifikanter Sicherheitsgewinn:**

Die Meldung von Lichtsignalanlagen könnte über die Integration des Fahrerassistenzsystems in den Nahbereichs-Datenaustausch per Funk erfolgen. Hierbei würde durch Berechnung des Abstands zur LSA, sowie aufgrund der aktuell gefahrenen Geschwindigkeit, bereits vor dem Erreichen der LSA ein Warnsignal an den Fahrer ausgegeben (bei Überschreitung definierter Werte). Zusätzlich würde innerhalb der Fahrerkabine der Status der LSA visuell auf einem Bildschirm angezeigt und bei Überschreitung festgelegter Grenzwerte eine akustische Warnung ausgegeben. Die visuelle Darstellung des LSA-Status sowie die akustische Warnung bei Überschreitung dieser Grenzwerte (Geschwindigkeit, Abstand zur LSA), würden den Fahrer bei Rot geschalteter LSA, zum Beispiel bei Unaufmerksamkeit, auf das Anhalten

aufmerksam machen. Würde der Fahrer trotz akustischer und visueller Hinweise die rote LSA dennoch überfahren, würden umliegende Fahrzeugführer durch das System gewarnt und ein „Halt-Befehl“ auf den Monitoren ausgegeben. Somit würde, in Bezug auf Kollisionen zwischen sich entgegentkommenden Fahrzeugen, die Kontrollierbarkeit verbessert und ein **Sicherheitsgewinn** entstehen. Kollisionen mit dem Stoß, dynamischen- oder statischen Objekten würden durch das Fahrerassistenzsystem nicht verhindert.

Unter Berücksichtigung von vorhandenen Schutzmaßnahmen zur Vermeidung von Kollisionen, dass mit Abfallgebinden beladene Fahrzeuge ausschließlich in Einbahnrichtung fahren dürfen, Transportwagen während des Entladevorganges vor der Entladekammer an der gekennzeichneten Halteposition warten bis das Stapelfahrzeug seine Position in der Entladekammer eingenommen hat oder, dass zur Einsicht in die Entladekammer an dem der Kammer gegenüberliegenden Stoß zu beiden Richtungen Verkehrsspiegel angebracht sind, kann ein Überfahren einer rot geschalteten LSA nicht ausgeschlossen werden. Da, je nach Fahrsituation, ein entgegentkommendes Fahrzeug wahrscheinlich von zumindest einem der Fahrer frühzeitig wahrgenommen würde und durch seine Reaktion (z. B. Bremsen) die Kollision abgewendet werden könnte, wird die Kontrollierbarkeit als normal kontrollierbar eingestuft. Durch bereits vorhandene Maßnahmen werden Kollisionen mit dem Stoß, dynamischen- oder statischen Objekten nicht verhindert, aber ausreichend vermieden. Falls ein technischer Defekt Ursache für eine Kollision wäre, könnte dies durch das betrachtete System nicht festgestellt und damit auch nicht weiter vermieden werden.

Durch die Integration des Fahrerassistenzsystems könnte ein **Sicherheitsgewinn** bei der Vermeidung von unbefugten Einfahrten in die ETS erzielt werden. Die bestehenden Schutzmaßnahmen zielen auf die Vermeidung von Kollisionen ab, die in der Folge eines unbefugten Einfahrens auftreten könnten. Kollisionen mit dem Stoß, dynamischen oder statischen Objekten könnten durch das Fahrerassistenzsystem sowie bereits vorhandene Maßnahmen nicht ausgeschlossen werden. Das Gleiche gilt für Kollisionen deren Ursache ein technischer Defekt oder eine körperliche Ursache (z. B. Ohnmacht) sind.

Nach aktuellem Stand sind die bestehenden Vorsorgemaßnahmen ausreichend. Es konnte **kein signifikanter Sicherheitsgewinn** identifiziert werden. In den von der BGE zur Verfügung gestellten Unterlagen müssen die bei der Inbetriebsetzung gewonnenen Erkenntnisse verwertet werden (siehe Nebenbestimmung A.4 - 3 des Planfeststellungsbeschlusses). Dazu gehören die Erkenntnisse über die tatsächliche Wirksamkeit der Verkehrsregelung durch Lichtsignalanlagen. Es sollte die tatsächliche Häufigkeit von Rotlicht-Verstößen sowie die Gesamtsituation (Ursache, Ort, andere Fahrzeuge, mögliche Auswirkungen etc.) dokumentiert werden. Damit wird auf Basis der gewonnenen Betriebserfahrung eine Beurteilung ermöglicht, ob der Einsatz von Nahbereichsdatenaustausch per Funk in Erwägung gezogen werden sollte.

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 69 von 97
		Stand: 19.02.2025

## **12.4 Übertragung von Fahrzeuginformationen per Nahbereichskommunikation**

Die Beschreibung des Systems erfolgt unter Abschnitt 8.2.4.

### **12.4.1 Fahrerassistenzsystem zum Nahbereichsdatenaustausch durch Übertragung von Fahrzeuginformationen per Nahbereichskommunikation**

Für die Entnahme der Abfallgebinde würden aktuelle Statusdaten, wie z. B. der Status des Leuchttableaus am Transportwagen, über ein Steuergerät abgegriffen und über Nahbereichsfunk (WPAN) an den Empfänger im Stapelfahrzeug übertragen werden. Dies würde sicherstellen, dass das Be- und Entladen des Transportwagens ausschließlich bei definierten Fahrzeugzuständen erfolgt.

Durch den Nahbereichsdatenaustausch durch Übertragung von Fahrzeuginformationen per Nahbereichskommunikation würden Fahrfehler (z. B. durch Unwissenheit der Statusdaten) reduziert und Kollisionen vermieden. Hierdurch könnte die Kontrollierbarkeit erhöht und ein **Sicherheitsgewinn** erzielt werden.

Tabelle 10: Bewertung: Nahbereichsdatenaustausch durch Übertragung von Fahrzeuginformationen per Nahbereichskommunikation

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
Transportwagen fährt geradeaus  Nr. 50, 51, 53, 55, 60, 64	In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Übertragung von Fahrzeuginformationen per Nahbereichskommunikation <b>kein Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da die Übertragung der Statusdaten während der Fahrt keinen Mehrwert brächte.
Transportwagen fährt über Rampe  Nr. 53, 55	
Transportwagen fährt Kurve  Nr. 50, 51, 53, 60, 64	
Transportwagen passiert Knotenpunkte  Nr. 50, 51, 53	
Stapelfahrzeug fährt von der Entladekammer zur Einlagekammer  Nr. 68	

Tabelle 10: Bewertung: Nahbereichsdatenaustausch durch Übertragung von Fahrzeuginformationen per Nahbereichskommunikation (Forts.)

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
<p>Stapelfahrzeug entlädt den Transportwagen in der Entladekammer</p> <p>Nr. 60, 64</p>	<p>In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Übertragung von Fahrzeuginformationen per Nahbereichskommunikation ein <b>Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da Kollisionen aufgrund von Fehlinformationen durch die Übertragung der Statusdaten/Betriebszustände während des Entladevorgangs vermieden würden.</p> <p>Kollisionen mit dem Stoß, Tauschpaletten oder Abfallgebinden, würden durch das System nicht verhindert, wodurch <b>kein Sicherheitsgewinn</b> erzielt würde. Ebenso würden technische Defekte nicht vom System erkannt und daraus resultierende Kollisionen nicht verhindert.</p> <p>Das Be- und Entladen des Transportwagens darf ausschließlich bei definierten Fahrzeugzuständen erfolgen.</p>
<p>Stapelfahrzeug entlädt das Abfallgebände in der Einlagerungskammer</p> <p>Nr. 78</p>	<p>In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Übertragung von Fahrzeuginformationen per Nahbereichskommunikation <b>kein Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da die Übertragung der Statusdaten während des Abladevorgangs in der Einlagerungskammer keinen Mehrwert brächte.</p>

**Signifikanter Sicherheitsgewinn:**

Die Übertragung von Fahrzeuginformationen per Nahbereichskommunikation würde innerhalb der betrachteten anlageninternen Ereignisse zu **keinem signifikanten Sicherheitsgewinn** führen, da die Übertragung und Anzeige von Fahrzeuginformationen im Fahrzeuginnenraum aufgrund bereits bestehender Maßnahmen, dass ein Be- und Entladevorgang ausschließlich bei definierten Fahrzeugzuständen erfolgt, eine kaum wahrnehmbare Verbesserung der Sicherheit in der Praxis erbrächte. Zudem können Fahrzeugführer über den integrierten Grubenfunk miteinander kommunizieren und den Status erfragen.

## 12.5 Optische Markierungen als Positionierhilfe

Die Beschreibung des Systems erfolgt unter Abschnitt 8.2.5.

### 12.5.1 Fahrerassistenzsystem zur Navigations- und Positionierhilfe über Linien- oder Kreuzlaser

Für die Entnahme der Abfallgebände würde ein Linien- oder Kreuzlaser am Stapelfahrzeug verbaut, welcher die Position der Aufnahmevorrichtung relativ zum Gebinde anzeigen würde. Da die Laserlinien in einem bestimmten Winkel zueinander abgestrahlt würden, würde der Linienabstand die Entfernung zum Gebinde repräsentieren. Durch den Linien- oder Kreuzlaser wäre eine genaue Positionierung des Gabelträgers zum Abfallgebände möglich, wodurch Kollisionen zwischen Stapelfahrzeug und Gebinde reduziert werden könnten. Hierdurch würde die Kontrollierbarkeit erhöht und ein **Sicherheitsgewinn** erzielt.

Tabelle 11: Bewertung: Navigations- und Positionierhilfe über Linien- oder Kreuzlaser

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
Transportwagen fährt geradeaus  Nr. 50, 51, 53, 55, 60, 64	In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Integration von Linien- oder Kreuzlasern <b>kein Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da diese beim Zurücklegen der Wegstrecke keinen Mehrwert erzeugen würden.
Transportwagen fährt über Rampe  Nr. 53, 55	
Transportwagen fährt Kurve  Nr. 50, 51, 53, 60, 64	
Transportwagen passiert Knotenpunkte  Nr. 50, 51, 53	
Stapelfahrzeug fährt von der Entladekammer zur Einlagekammer  Nr. 68	



Tabelle 11: Bewertung: Navigations- und Positionierhilfe über Linien- oder Kreuzlaser (Forts.)

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
<p>Stapelfahrzeug entlädt den Transportwagen in der Entladekammer</p> <p>Nr. 60, 64</p>	<p>In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Integration von Linien- oder Kreuzlasern ein <b>Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da Kollisionen vermieden würden, welche beim Anfahren an den Transportwagen und der Aufnahme des Transportbehälters auftreten könnten. Der Fahrer des Stapelfahrzeugs könnte die Positionierung des Gabelträgers zum Abfallgebäude präzise umsetzen. Kollisionen mit dem Stoß würden nicht verhindert.</p> <p><b>Kein Sicherheitsgewinn</b> bei Kollisionen resultierend aus einem technischen Defekt (z. B. defektes Bremssystem), da ein technischer Defekt vom System nicht erkannt und verhindert würde.</p> <p>Das Stapelfahrzeug ist mit insgesamt acht Kameras ausgestattet, welche die Verriegelung von Containern, die Gabelzinken sowie den Spreader und die Spitzen der Gabelzinken erfassen und visuell überwachen. Der Stapelfahrer hat zu jeder Zeit die Möglichkeit, sich die Bilder der Kameras in der Fahrerkabine anzeigen zu lassen. Zudem sind am Stapelfahrzeug weitere verschiedene Sensoren zur Überwachung von Einstellungen und Zuständen verbaut (z. B. Überwachung der Hubmaststellung durch Wegemesssystem (WMS), Überwachung des Spreader-Schenkwinkels durch WMS, Überwachung bei der Aufnahme von Lasten/der Gabelzinken durch Näherungsschalter und Ultraschallsensoren, Überwachung der Fahrgeschwindigkeit).</p>

Tabelle 11: Bewertung: Navigations- und Positionierhilfe über Linien- oder Kreuzlaser (Forts.)

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
<p>Stapelfahrzeug entlädt das Abfallgebände in der Einlagekammer</p> <p>Nr. 78</p>	<p>Im betrachteten anlageninternen Ereignis würde durch die Integration von Linien- oder Kreuzlasern ein <b>Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da Kollisionen vermieden würden, welche beim Anfahren an die Entladefläche und dem Abladen des Transportbehälters auftreten könnten. Der Fahrer des Stapelfahrzeugs könnte die Positionierung des Gabelträgers zum Abladeort der Abfallgebände präzise umsetzen.</p> <p><b>Kein Sicherheitsgewinn</b> bei Kollisionen resultierend aus einem technischen Defekt (z. B. defektes Bremssystem), da ein technischer Defekt vom System nicht erkannt und verhindert würde.</p> <p>Das Stapelfahrzeug ist mit insgesamt acht Kameras ausgestattet, welche die Verriegelung von Containern, die Gabelzinken sowie den Spreader und die Spitzen der Gabelzinken erfassen und visuell überwachen. Der Stapelfahrer hat zu jeder Zeit die Möglichkeit, sich die Bilder der Kameras in der Fahrerkabine anzeigen zu lassen. Zudem sind am Stapelfahrzeug weitere verschiedene Sensoren zur Überwachung von Einstellungen und Zuständen verbaut (z. B. Überwachung der Hubmaststellung durch Wegemesssystem (WMS), Überwachung des Spreader-Schenkwinkels durch WMS, Überwachung bei der Aufnahme von Lasten/der Gabelzinken durch Näherungsschalter und Ultraschallsensoren, Überwachung der Fahrgeschwindigkeit).</p>

**Signifikanter Sicherheitsgewinn:**

Durch die bereits am Stapelfahrzeug integrierten acht Kameras sowie weiteren verschiedenen Sensoren zur Überwachung von Einstellungen und Zuständen, bekommt der Stapelfahrer sein direktes Umfeld visuell in der Fahrerkabine angezeigt und hat beim Be- und Entladen von Abfallgebänden ausreichende Maßnahmen zur Erfassung der Situationen. Die zusätzliche Anbringung von Linien- oder Kreuzlinienlasern würde in den betrachteten anlageninternen Ereignissen keine wahrnehmbare Verbesserung der Sicherheit in der Praxis aufzeigen und somit **keinen signifikanten Sicherheitsgewinn** erzielen.

## 12.5.2 Fahrerassistenzsystem zur Navigations- und Positionierhilfe über codierte Marker

Für die Entnahme der Abfallgebinde würden codierte Marker auf Objekten (Abfallgebänden) angebracht, welche von einer Kamera am Stapelfahrzeug ausgelesen würden. Die identifizierten Objektinformationen, wie zum Beispiel die Art der Aufnahmepunkte oder deren relative Position zum Marker, würden visuell auf einem Monitor im Stapelfahrzeug angezeigt.

Durch codierte Marker könnten Kollisionen zwischen Stapelfahrzeug und Abfallgebinde verhindert werden. Hierdurch könnte die Kontrollierbarkeit erhöht und ein **Sicherheitsgewinn** erzielt werden.

Tabelle 12: Bewertung: Navigations- und Positionierhilfe über codierte Marker

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
Transportwagen fährt geradeaus  Nr. 50, 51, 53, 55, 60, 64	In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Integration von codierten Markern <b>kein Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da diese beim Zurücklegen der Wegstrecke keinen Mehrwert erzeugen würden.
Transportwagen fährt über Rampe  Nr. 53, 55	
Transportwagen fährt Kurve  Nr. 50, 51, 53, 60, 64	
Transportwagen passiert Knotenpunkte  Nr. 50, 51, 53	
Stapelfahrzeug fährt aus der Entladekammer in die Einlagekammer  Nr. 68	

Tabelle 12: Bewertung: Navigations- und Positionierhilfe über codierte Marker (Forts.)

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
<p>Stapelfahrzeug entlädt den Transportwagen in der Entladekammer</p> <p>Nr. 60, 64</p>	<p>In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Integration von codierten Markern ein <b>Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da Kollisionen vermieden würden, welche zum Beispiel aufgrund eingeschränkter oder widriger Sichtbedingungen zustande kommen könnten. Durch die codierten Marker stünden dem Fahrer genaue Informationen zum Gebinde zur Verfügung und der Fahrer könnte das Gebinde präzise Be- oder Entladen.</p> <p>Kollisionen mit dem Stoß, bereits eingelagerten Abfallgebinden sowie leeren Tausch-/ Transportpaletten würden nicht verhindert.</p> <p>Im Falle eines technischen Defektes am Fahrzeug (z. B. defektes Bremssystem), würde durch das System <b>kein Sicherheitsgewinn</b> erzielt, da der Defekt vom System nicht erkannt und daraus resultierende Kollisionen nicht verhindert würden.</p> <p>Das Stapelfahrzeug ist mit insgesamt acht Kameras ausgestattet, welche die Verriegelung von Containern, die Gabelzinken sowie den Spreader und die Spitzen der Gabelzinken erfassen und visuell überwachen. Der Stapelfahrer hat zu jeder Zeit die Möglichkeit, sich die Bilder der Kameras in der Fahrerkabine anzeigen zu lassen. Zudem sind am Stapelfahrzeug weitere verschiedene Sensoren zur Überwachung von Einstellungen und Zuständen verbaut (z. B. Überwachung der Hubmaststellung durch Wegemesssystem (WMS), Überwachung des Spreader-Schenkwinkels durch WMS, Überwachung bei der Aufnahme von Lasten/der Gabelzinken durch Näherungsschalter und Ultraschallsensoren, Überwachung der Fahrgeschwindigkeit).</p>

Tabelle 12: Bewertung: Navigations- und Positionierhilfe über codierte Marker (Forts.)

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
<p>Stapelfahrzeug entlädt das Abfallgebände in der Einlagerungskammer</p> <p>Nr. 78</p>	<p>Im betrachteten anlageninternen Ereignis würde durch die Integration von codierten Markern <b>kein Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da das Stapelfahrzeug bereits beladen wäre und Folgekollisionen mit Abfallgebänden nicht verhindert würden.</p> <p>Im Falle eines technischen Defektes am Fahrzeug (z. B. defektes Bremssystem), würde durch das System <b>kein Sicherheitsgewinn</b> erzielt werden, da der Defekt vom System nicht erkannt und daraus resultierende Kollisionen nicht verhindert würden.</p> <p>Das Stapelfahrzeug ist mit insgesamt acht Kameras ausgestattet, welche die Verriegelung von Containern, die Gabelzinken sowie den Spreader und die Spitzen der Gabelzinken erfassen und visuell überwachen. Der Stapelfahrer hat zu jeder Zeit die Möglichkeit, sich die Bilder der Kameras in der Fahrerkabine anzeigen zu lassen. Zudem sind am Stapelfahrzeug weitere verschiedene Sensoren zur Überwachung von Einstellungen und Zuständen verbaut (z. B. Überwachung der Hubmaststellung durch Wegemesssystem (WMS), Überwachung des Spreader-Schenkwinkels durch WMS, Überwachung bei der Aufnahme von Lasten/der Gabelzinken durch Näherungsschalter und Ultraschallsensoren, Überwachung der Fahrgeschwindigkeit).</p>

**Signifikanter Sicherheitsgewinn:**

Durch die bereits am Stapelfahrzeug integrierten acht Kameras sowie weiteren verschiedenen Sensoren zur Überwachung von Einstellungen und Zuständen bekommt der Stapelfahrer sein direktes Umfeld visuell in der Fahrerkabine angezeigt und hat beim Be- und Entladen von Containern und Abfallgebänden ausreichende Maßnahmen zur Erfassung der Situationen. Die zusätzliche Anbringung von codierten Markern würde in den betrachteten anlageninternen Ereignissen keine wahrnehmbare Verbesserung der Sicherheit in der Praxis aufzeigen und somit **keinen signifikanten Sicherheitsgewinn** erzielen.

## 12.6 Hinderniserkennung zur Kollisionsvermeidung

Die Beschreibung des Systems erfolgt unter Abschnitt 8.2.6.

### 12.6.1 Fahrerassistenzsystem zur sensorbasierten Umfelderkennung durch Lidarsensoren

Durch die Erfassung der Fahrzeugumgebung mittels Lidarsensoren, die an Front und Heck der Fahrzeuge verbaut wären, würden bei drohender Kollision (Eintreten von Objekten in den Schutzbereich) unter Einbezug der aktuellen Geschwindigkeit und des Lenkwinkels akustische und optische Fahrerwarnungen ausgegeben. Ein Monitor im Fahrzeuginneren würde den Schutzbereich des Fahrzeugs anzeigen. Würde bei einem erkannten Objekt innerhalb des Schutzbereichs die Fahrgeschwindigkeit nicht angepasst werden, würde das Fahrzeug in einen sicheren Zustand überführt. Durch die erhöhte Einsehbarkeit und Erfassung der Fahrzeugumgebung, könnte der Fahrzeugführer andere Fahrzeuge oder stationäre Objekte frühzeitig erkennen und somit Kollisionen vermeiden. Hierdurch könnte die Kontrollierbarkeit erhöht und ein **Sicherheitsgewinn** erzielt werden.

Tabelle 13: Bewertung: Sensorbasierte Umfelderkennung Lidarsensoren

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
Transportwagen fährt geradeaus Nr. 50, 51, 53, 55, 60, 64	In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Integration von Lidarsensoren zur sensorbasierten Umfelderkennung ein <b>Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da die Erfassung der Fahrzeugumgebung zur Erkennung und Vermeidung potentieller Kollisionen erhöht würde. Über die Ausgabe von Warnungen und den aktiven Eingriff des Systems in das Fahrgeschehen würden Kollisionen mit dem Stoß sowie anderen statischen- und dynamischen Objekten vermieden.
Transportwagen fährt über Rampe Nr. 53, 55	Im Falle eines technischen Defektes am Fahrzeug (z. B. defekte Lenkung, defektes Bremssystem) würde durch das System ein <b>Sicherheitsgewinn</b> erzielt, da die sensorbasierte Umfelderkennung diesen Defekt durch den Abgleich der Odometriedaten erkennen und aktiv in die Aktorik eingreifen würde. Daraus resultierende Kollisionen würden vermieden.
Transportwagen fährt Kurve Nr. 50, 51, 53, 60, 64	Durch die Beobachtung des Monitors im Fahrzeuginneren des Transportwagens, könnte beim Zurücklegen der Wegstrecke ein <b>Sicherheitsverlust</b> entstehen, da der Fahrer seinen direkten Blick von der Fahrbahn abwenden würde.

Tabelle 13: Bewertung: Sensorbasierte Umfelderkennung Lidarsensoren (Forts.)

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
<p>Transportwagen passiert Knotenpunkte</p> <p>Nr. 50, 51, 53</p>	<p>In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Integration von Lidarsensoren zur sensorbasierten Umfelderkennung ein <b>Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da die Erfassung der Fahrzeugumgebung zur Erkennung und Vermeidung potentieller Kollisionen erhöht würde. Über die Ausgabe von Warnungen und den aktiven Eingriff des Systems in das Fahrgeschehen würden Kollisionen mit dem Stoß, statischen- und dynamischen Objekten sowie anderen Fahrzeugen an Knotenpunkten und schwer einsehbaren Stellen vermieden.</p> <p>Im Falle eines technischen Defektes am Fahrzeug (z. B. defekte Lenkung, defektes Bremssystem) würde durch das System ein <b>Sicherheitsgewinn</b> erzielt werden, da die sensorbasierte Umfelderkennung diesen Defekt durch den Abgleich der Odometriedaten erkennen und aktiv in die Aktorik eingreifen würde. Daraus resultierende Kollisionen würden vermieden.</p> <p>In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Integration von Lidarsensoren zur sensorbasierten Umfelderkennung <b>kein Sicherheitsgewinn</b> zur Erkennung einer defekten Verkehrsregeleinrichtung entstehen. Die Verkehrsregeleinrichtung würde vom System nicht erkannt und ein Überfahren einer rot geschalteten LSA würde nicht vermieden. Somit könnten sich Fahrzeuge auf einem gesperrten Streckenabschnitt begegnen. Durch die Beobachtung des Monitors im Fahrzeuginneren beim Überfahren von Knotenpunkten könnte ein Sicherheitsverlust entstehen, da der Fahrer seinen direkten Blick von der Fahrbahn abwenden würde.</p>

Tabelle 13: Bewertung: Sensorbasierte Umfelderkennung Lidarsensoren (Forts.)

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
Stapelfahrzeug fährt aus der Entladekammer in die Einlagekammer  Nr. 68	In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die Integration von Lidarsensoren zur sensorbasierten Umfelderkennung ein <b>Sicherheitsgewinn</b> entstehen beim Rangieren, da die Erfassung der Fahrzeugumgebung zur Erkennung und Vermeidung potentieller Kollisionen erhöht würde. Über die Ausgabe von Warnungen und den aktiven Eingriff des Systems in das Fahrgeschehen würden Kollisionen mit dem Stoß, statischen- und dynamischen Objekten vermieden.
Stapelfahrzeug entlädt den Transportwagen in der Entladekammer  Nr. 60, 64	Im Falle eines technischen Defektes am Fahrzeug (z. B. defekte Lenkung, defektes Bremssystem) würde durch das System ein <b>Sicherheitsgewinn</b> erzielt werden, da die sensorbasierte Umfelderkennung diesen Defekt durch den Abgleich der Odometriedaten erkennen und aktiv in die Aktorik eingreifen würde. Daraus resultierende Kollisionen würden vermieden.
Stapelfahrzeug entlädt das Abfallgebände in der Einlagekammer  Nr. 78	Zur Einsicht in die Entladekammer sind an dem der Kammer gegenüberliegenden Stoß zu beiden Richtungen Verkehrsspiegel angebracht, wodurch die Einsehbarkeit in schwer einsehbare Bereiche erhöht wird. Das Stapelfahrzeug ist mit insgesamt acht Kameras ausgestattet (Kap. 5.2). Der Stapelfahrer hat zu jeder Zeit die Möglichkeit, sich die Bilder der Kameras in der Fahrerkabine anzeigen zu lassen. Zudem sind am Stapelfahrzeug weitere verschiedene Sensoren zur Überwachung von Einstellungen und Zuständen verbaut (z. B. Überwachung der Hubmaststellung durch Wegemesssystem (WMS), Überwachung des Spreader-Schenkels durch WMS, Überwachung bei der Aufnahme von Lasten/der Gabelzinken durch Näherungsschalter und Ultraschallsensoren, Überwachung der Fahrgeschwindigkeit).

**Signifikanter Sicherheitsgewinn:**

Durch die Integration von Lidarsensoren in den Transportwagen wären durch die Erfassung der Fahrzeugumgebung, zur Erkennung und Vermeidung potentieller Kollisionen mit entgegenkommenden Fahrzeugen, dem Stoß oder dynamischen- sowie statischen Objekten die Kontrollierbarkeit erhöht, wodurch ein **Sicherheitsgewinn** erzielt würde. Durch das System könnten technische Defekte (defekte Lenkung, defekte Bremsung) erkannt und aktiv in die Aktorik eingegriffen werden (Einleitung sicherer Zustand). Dennoch müsste der Fahrer, falls vom System eine Fahrsituation nicht bewältigt werden könnte, jederzeit in der Lage sein die Fahraufgabe übernehmen zu können. Der Fahrer bliebe in der gesamten Fahrsituation in der Verantwortung. Durch die Beobachtung des Monitors im Fahrzeuginneren des Transportwagens, könnte beim Zurücklegen der Wegstrecke ein **Sicherheitsverlust** entstehen, da der Fahrer seinen direkten Blick von der Fahrbahn abwenden würde. Die Einfahrt in einen ge-



	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 81 von 97
		Stand: 19.02.2025

sperrten Streckenabschnitt würde durch das System nicht verhindert und defekte Verkehrsregelungen nicht erkannt. Für den ordnungsgemäßen Betrieb des Systems müsste sichergestellt sein, dass Lidarsensoren durch den Betrieb unter Tage ordnungsgemäß funktionieren und regelmäßig gereinigt und gewartet werden.

Durch Integration von Lidarsensoren im Stapelfahrzeug würde beim Rangieren ein Sicherheitsgewinn erzielt, da die Fahrzeugumgebung erfasst und auf einem Monitor abgebildet würde. Somit würde die Kontrollierbarkeit zur Vermeidung von potentiellen Kollisionen mit dem Stoß, dynamischen- oder statischen Objekten erhöht. Durch bereits bestehende Schutzmaßnahmen, wie die im Stapelfahrzeug implementierten Kameras, wird das Fahrzeugumfeld visuell abgebildet und Informationen zur Überwachung von Einstellungen und Zuständen werden dem Fahrer angezeigt. Hierdurch würde die Integration von Lidarsensoren zur Umfeldvisualisierung durch eine erweiterte Erfassung der Fahrzeugumgebung einen **Sicherheitsgewinn** liefern, jedoch wird durch die bereits implementierten Kameras kein erheblicher Mehrwert in der Praxis erwartet. Zusätzlich sind für eine bessere Einsicht in die Entladekammer an dem der Kammer gegenüberliegenden Stoß zu beiden Richtungen Verkehrsspiegel angebracht, wodurch die Einsehbarkeit in schwer einsehbare Bereiche erhöht wird.

Durch die Integration des Fahrerassistenzsystems für die Vermeidung von Kollisionen in bestimmten Fahrsituationen würde sich zwar ein **Sicherheitsgewinn** erzielen, jedoch wird nicht in jeder Fahrsituation und für jedes Fahrzeug ein wesentlicher Mehrwert in der Praxis erwartet. Nach aktuellem Stand sind die bestehenden Vorsorgemaßnahmen ausreichend, damit konnte **kein signifikanter Sicherheitsgewinn** identifiziert werden.

In den von der BGE zur Verfügung gestellten Unterlagen müssen die bei der Inbetriebsetzung gewonnenen Erkenntnisse verwertet werden (siehe Nebenbestimmung A.4 - 3 des Planfeststellungsbeschlusses). Dazu gehören u. a. die Erkenntnisse über die tatsächliche Wirksamkeit der Verkehrsregelung durch Lichtsignalanlagen. Es sollten die tatsächlichen Häufigkeiten von Kollisionen mit dem Stoß, entgegenkommenden Fahrzeugen oder anderen dynamischen- oder statischen Objekten, von Rotlicht-Verstößen sowie die Gesamtsituation (Ursache, Ort, andere Fahrzeuge im relevanten Bereich, mögliche Auswirkung etc.) dokumentiert werden. Hierbei könnte es auch sinnvoll sein Beinahe-Unfälle bzw. -Kollisionen zu erfassen. Damit wird auf Basis der gewonnenen Betriebserfahrung eine Beurteilung ermöglicht, ob der Einsatz von Lidarsensoren in Erwägung gezogen werden sollte.

## 12.7 Automatisierte Querführung- und Längsführung

Die Beschreibung des Systems erfolgt unter Abschnitt 8.2.7.

### 12.7.1 Fahrerassistenzsystem zur automatisierten Fahrzeugführung durch kartenbasierte Querführung- und Längsführung

Mittels präziser 3D-Sensorik würden alle zu befahrenen Streckenabschnitte (für den Transportwagen) vermessen und die Daten in eine digitale Karte überführt sowie eine kollisionsfreie Trajektorie errechnet. Anhand von am Transportwagen angebrachten Lidarsensoren an Front und Heck und der Fusionierung von Karteninformationen, Fahrgeschwindigkeit und dem Fahrzeuglenkwinkel würde die Position des Transportwagens innerhalb der Strecke präzise ermittelt werden können. Somit würde der Transportwagen entlang des, in die Karte projizierten, kollisionsfreien Weges geführt.

Durch die automatisierte Quer- und Längsführung könnten Fahrfehler (z. B. durch Unaufmerksamkeit des Fahrers) reduziert und Kollisionen verhindert werden. Hierdurch könnte die Kontrollierbarkeit erhöht und ein **Sicherheitsgewinn** erzielt werden.

Tabelle 14: Bewertung: Automatisierte Fahrzeugführung durch kartenbasierte Quer- und Längsführung

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
Transportwagen fährt geradeaus Nr. 50, 51, 53, 55, 60, 64	In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die automatisierte Fahrzeugführung durch kartenbasierte Quer- und Längsführung ein <b>Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da durch die kartenbasierte und Lidarsensorik unterstützte Fahrzeugführung, Kollisionen mit dem Stoß sowie anderen statischen und dynamischen Objekten vermieden würden. Die Erfassung der Fahrzeugumgebung zur Erkennung und Vermeidung potentieller Kollisionen würde erhöht.
Transportwagen fährt über Rampe Nr. 53, 55	Im Falle eines technischen Defektes am Fahrzeug (z. B. defekte Lenkung, defektes Bremssystem) würde durch das System ein <b>Sicherheitsgewinn</b> erzielt werden, da das System den Defekt erkennt und aktiv in die Fahrzeugaktuatorik eingreifen würde. Daraus resultierende Kollisionen würden vermieden.
Transportwagen fährt Kurve Nr. 50, 51, 53, 60, 64	

Tabelle 14: Bewertung: Automatisierte Fahrzeugführung durch kartenbasierte Quer- und Längsführung (Forts.)

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
<p>Transportwagen passiert Knotenpunkte</p> <p>Nr. 50, 51, 53</p>	<p>In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die automatisierte Fahrzeugführung durch kartenbasierte Quer- und Längsführung beim Abbiegen ein <b>Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da die Erfassung der Fahrzeugumgebung zur Erkennung und Vermeidung potentieller Kollisionen erhöht würde. Kollisionen mit dem Stoß oder anderen Transportmitteln würden beim Abbiegen an schwer einsehbaren Stellen verhindert.</p> <p>In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die automatisierte Fahrzeugführung durch kartenbasierte Quer- und Längsführung <b>kein Sicherheitsgewinn</b> bei der Erkennung einer defekten Verkehrsregeleinrichtung und Überfahren eines Rotsignals entstehen, da das System den Status der LSA nicht erkennen würde.</p> <p>Im Falle eines technischen Defektes am Fahrzeug (z. B. defekte Lenkung, defektes Bremssystem) würde durch das System ein <b>Sicherheitsgewinn</b> erzielt werden, da die automatisierte Fahrzeugführung durch kartenbasierte Quer- und Längsführung den Defekt erkennen würde und aktiv in die Fahrzeugaktoria eingreifen würde (einleiten sicherer Zustand). Daraus resultierende Kollisionen würden verhindert.</p>

Tabelle 14: Bewertung: Automatisierte Fahrzeugführung durch kartenbasierte Quer- und Längsführung (Forts.)

Fahrsituationen	Bewertung des Sicherheitsgewinns
Stapelfahrzeug entlädt den Transportwagen in der Entladekammer  Nr. 60, 64	In den betrachteten anlageninternen Ereignissen würde durch die automatisierte Fahrzeugführung durch kartenbasierte Quer- und Längsführung für das Stapelfahrzeug <b>kein Sicherheitsgewinn</b> entstehen, da sich aufgrund der kontinuierlich ändernden Fahrwege des Stapelfahrzeugs, Streckenabschnitte in der Praxis kaum vermessen lassen würden.
Stapelfahrzeug fährt aus Entladekammer in die Einlagerungskammer  Nr. 68	
Stapelfahrzeug entlädt das Abfallgebände in der Einlagerungskammer  Nr. 78	

**Signifikanter Sicherheitsgewinn:**

Durch die Fusion von kartenbasierten Daten mit der sensorgestützten automatisierten Quer- und Längsführung würde **kein signifikanter Sicherheitsgewinn** erzielt werden, da keine wahrnehmbare Verbesserung der Sicherheit in der Praxis aufgezeigt werden kann. Durch das System würden Kollisionen mit dem Stoß, statischen- und dynamischen Objekten verhindert sowie technische Defekte erkannt und entsprechende Maßnahmen (aktives Eingreifen in die Fahrzeugaktorik, Einleiten sicherer Zustand) eingeleitet. Der Fahrer verbliebe jedoch während der gesamten Zeit in der Verantwortung, müsste das Fahrgeschehen überwachen und in für das System nicht durchführbaren Situationen die Fahraufgabe übernehmen. Zusätzlich müsste sichergestellt sein, dass die Lidarsensoren durch den Betrieb unter Tage ordnungsgemäß funktionieren und regelmäßig gereinigt und gewartet werden. Ebenfalls müsste regelmäßig geprüft werden, ob die bereits vermessenen Streckenabschnitte entsprechend bei Änderungen der Strecke aktualisiert wurden. Durch die Überwachung vom Stand der Wissenschaft und Technik bei der kartenbasierten Quer- und Längsführung sowie der möglichen Integration weiterer Systeme könnte der Sicherheitsgewinn erhöht werden.

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 85 von 97
		Stand: 19.02.2025

## 12.8 Teleoperierter Betrieb

Die Beschreibung des Systems erfolgt unter Abschnitt 8.2.8.

### 12.8.1 Teleoperiertes System zur Fernsteuerung der Systeme durch Übertragung von Bild- und Statusdaten nach über Tage bzw. von Steuerbefehlen nach unter Tage

Die Fahrzeuge (Transportwagen, Stapelfahrzeug) würden mit Kamerasystemen, Mikrofonen, Beschleunigungssensoren sowie Schnittstellen zu den einzelnen Steuergeräten ausgerüstet werden. Die gesammelten Daten würden zentral zusammengetragen und über Funk (WiFi Access Points) nach über Tage (per Kabel) übermittelt werden.

An einem Bedienstand über Tage würden die Status- und Kameradaten angezeigt, Audiosignale abgespielt und Fahrzeugvibrationen auf den Bedienerstuhl übertragen werden. Mit Hilfe von Joysticks, Pedalerie und Lenkrädern würden Fahrbefehle entgegengenommen und an das entsprechende Fahrzeug nach unter Tage übertragen werden. Bei einem Signalabriss würde das Fahrzeug in einen sicheren Zustand überführt werden.

Durch das teleoperierte System würde der menschliche Faktor aus dem Betrieb unter Tage herausgenommen und durch die am Fahrzeug implementierten Sensoren hätten die Fahrzeugführer von über Tage eine gute Detailübersicht über die Situationen. Hierdurch könnte die Kontrollierbarkeit erhöht und ein Sicherheitsgewinn erzielt werden.

Jedoch ist anzumerken, dass durch einen Fahrzeugführer im Fahrzeug eine höhere und direktere Wahrnehmung der Umgebung und ein besserer Bezug zur Umgebung und zu der Fahrsituation hergestellt wird.

Ein Sicherheitsgewinn zur Vermeidung von Kollisionen durch teleoperiertes Fahren kann nicht pauschal angenommen werden.

#### **Signifikanter Sicherheitsgewinn:**

Durch die Integration eines teleoperierten Systems zur Fernsteuerung der Systeme durch Übertragung von Bild- und Statusdaten nach über Tage bzw. von Steuerbefehlen nach unter Tage würde **kein signifikanter Sicherheitsgewinn** erzielt werden, da keine wahrnehmbare Verbesserung der Sicherheit in der Praxis aufgezeigt werden kann. Durch den Einsatz von Fahrern unter Tage wird durch den Fahrzeugführer ein besserer Bezug zur Umgebung und den Fahrsituationen hergestellt. Die Herausnahme des Fahrzeugführers aus dem direkten Szenario unter Tage würde zu einem Sicherheitsverlust führen, da die ausschließliche Betrachtung der Fahrzeugumgebung und Situation über Bildschirme vom Fahrgeschehen monotoner erscheinen kann und daher zu Unaufmerksamkeiten führen könnte. Weiterhin dürfte der technische als auch administrative Aufwand für eine derartige Nachrüstlösung signifikant sein, insbesondere um alle zulassungsrelevanten Aspekte zu betrachten und die notwendigen Sicherheitsnachweise zu erbringen. Gleichfalls müssten etwaige Auswirkungen auf die Infrastruktur, wie z.B. Voraussetzungen für eine sichere und stabile Datenkommunikation unter den jeweiligen geologischen Bedingungen, genauer analysiert werden. Zukünftig sollte die Integration eines teleoperierten Systems unter Berücksichtigung

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 86 von 97
		Stand: 19.02.2025

des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik sowie der potenziellen Einwirkung von Exposition des Bedienpersonals unter Tage weiterhin untersucht werden.

### 13. Ergebnisse und Empfehlungen

In dieser Analyse wird qualitativ bewertet, ob sich durch den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen oder autonomen Fahrsystemen gegenüber dem planfestgestellten Sicherheitsniveau ein **signifikanter Sicherheitsgewinn** erzielen ließe. Der Fokus der Aufgabenstellung liegt dabei auf dem mit einem Abfallgebinde beladenen Transportwagen und dem Stapelfahrzeug, da eine Kollision dieser Fahrzeuge aufgrund der involvierten Abfallgebinde von Relevanz ist.

Ausgehend von dem in der Phase 1 der ÜsiKo ermittelten Delta und den im PFB Konrad [1] vorgesehenen, und den zwischenzeitlich ergänzten Maßnahmen (PFB plus zusätzliche Maßnahmen, wie z. B. Spiegel oder Kameras am Stapelfahrzeug) zur Vermeidung von Kollisionen wurden die hier angegebenen Sicherheitsbetrachtungen durchgeführt. Dabei werden bestehende administrative, infrastrukturelle und technische Maßnahmen an den Fahrzeugen berücksichtigt. Neben dem Einsatz von Fahrerassistenzsystemen und autonomen Systemen wird zusätzlich betrachtet, ob die Einfahrt eines Fahrzeuges in einen gesperrten Streckenabschnitt (Überfahren eines roten Lichtsignals) durch zusätzliche Optimierungsmaßnahmen erschwert werden kann oder ob zusätzliche, ergänzende Maßnahmen in Betracht kommen. Bei allen zusätzlichen Systemen wird, wie auch für die aktuell geplanten Systeme, eine regelmäßige Wartung und Instandhaltung vorausgesetzt. Da ein vorsätzliches Fehlverhalten von Personen nicht zu unterstellen ist, wird dies hier auch nicht weiter untersucht.

Es zeigt sich, dass die aktuell geplanten Maßnahmen ein hohes Sicherheitsniveau garantieren und die potentiellen Störfälle sicher beherrscht werden (siehe EU228 [38]). Die geforderte Schadensvorsorge ist gegeben. Ungeachtet dessen sind Optimierungsmaßnahmen denkbar, um menschliches Fehlverhalten oder ein Fahrzeugdefekt weiter zu reduzieren. Insbesondere kann unbeabsichtigtes menschliches Fehlverhalten/Unaufmerksamkeit, ein Defekt am Fahrzeug oder der Infrastruktur als Ursache für Kollisionen nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Ausgehend von praxistauglichen und für den Untertageeinsatz erprobten Systemen wird bewertet, ob es Fahrerassistenzsysteme oder autonome Systeme gibt, die einen signifikanten Sicherheitsgewinn für den Einlagerungsbetrieb liefern würden. **In der Analyse hat sich kein System ergeben, dass gegenüber den bestehenden Sicherheitsmaßnahmen einen signifikanten Sicherheitsgewinn liefern würde.** Daher kann hier gemäß Aufgabenstellung **keine Empfehlung** für die Integration von Fahrerassistenzsystem oder autonomen Systemen gegeben werden.

Identifiziert wurden einige Systeme, die auf Basis der in der Inbetriebsetzungsphase gewonnenen Betriebserfahrung nachträglich in Betracht gezogen werden könnten. Es handelt sich um Systeme, deren Integration keine Auswirkungen auf die in der EU 228 [43] dargestellten sicher beherrschten Störfälle nimmt. Zudem wären diese Systeme in die bestehenden Systeme und Fahrzeuge gemäß PFB nachträglich integrierbar. Diese werden in den Kapiteln 13.1 bis 13.3 in Form von Hinweisen dargestellt.

Zentrale Punkte bei der Betrachtung sind die Vermeidung des Zusammenstoßes von zwei Fahrzeugen (eines davon mit einem Abfallgebilde beladen) sowie des Zusammenstoßes eines beladenen Transportwagens mit dem Stoß oder einem anderen Hindernis.

Aufbauend auf dem bestehenden System zur Verkehrslenkung könnten die folgenden beiden Systeme einen Sicherheitsgewinn in Bezug auf die Vermeidung von Kollisionen zweier Fahrzeuge eröffnen, indem Sie die Einfahrt in gesperrte Streckenabschnitte verhindern/detektieren und ggf. selbstständig alle Beteiligten warnen könnten:

1. Erweiterung der Lichtsignalanlagen (LSA) an den Knotenpunkten mit Schrankenanlagen zur weiteren Verhinderung von Rotlicht-Verstößen,
2. Integration des Fahrerassistenzsystems zum Nahbereichsdatenaustausch per Funk durch Meldung von Lichtsignalanlagen in die Fahrerkabine (Vermeidung von Rotlicht-Verstößen). Dies wäre eine alternative Option zur Erweiterung der LSA durch Schrankenanlagen.

Zur Vermeidung von Kollisionen mit dem Stoß oder anderen Hindernissen hat sich das folgende System als System mit potentiellm Sicherheitsgewinn herausgestellt, da es dem Fahrer rechtzeitig Informationen zu Hindernissen oder bevorstehenden Kollisionen bereitstellen könnte, damit dieser die Kollisionen frühzeitig verhindern könnte:

3. Integration von Lidarsensoren in den Transportwagen zur sensorbasierten Umfelderkennung zur Warnung/Information vor Kollisionen mit dem Stoß oder Hindernissen.

Alle drei Systeme könnten als Nachrüstung in die Infrastruktur sowie in die Fahrzeuge eingebaut werden, ohne dass bestehende Planungen grundlegend verändert werden müssten. Den stärksten Eingriff hierbei hätte die Integration des Fahrerassistenzsystems zum Nahbereichsdatenaustausch per Funk, da hier mehrere Systeme und Fahrzeuge (LSA, Fahrzeugdaten, Monitor in der Fahrerkabine) miteinander technisch gekoppelt werden müssten. Gegenüber aktiven Systemen, die selbst in die Aktorik der Fahrzeuge eingreifen können, sind diese passiven rein informierenden/warnenden Systeme erheblich weniger aufwendig, da sie in die bereits gefertigten und genehmigten Fahrzeuge/Systeme nachgerüstet werden könnten.

#### Ausblick:

Auch wenn im Rahmen dieser Betrachtungen zur Kollisionsvermeidung im Einlagerungsbetrieb keine Systeme identifiziert werden konnten, die in Bezug auf die Kollisionsvermeidung einen signifikanten Sicherheitsgewinn (Vergleich zum aktuellen Stand) liefern würden, so könnte der Einsatz von Fahrerassistenzsystemen und autonomen Systemen dennoch Vorteile bringen.

Daher sollte das Thema Einsatz von Fahrerassistenzsystemen und autonomen Systemen in Zukunft weiter beobachtet werden und auf Tauglichkeit geprüft werden. Dies könnte zum Beispiel erfolgen, wenn im Betrieb des Endlagers Fahrzeuge ausgetauscht werden müssen.

Ein Beispiel für andere Randbedingungen könnte die Verringerung der beruflichen Exposition des Betriebspersonals durch den Einsatz autonomer Systeme sein. Hier gilt es aber auch alle Konsequenzen, wie die Herausnahme des Fahrers aus dem direkten Betriebsgeschehen, zu berücksichtigen. Ob und wie sich durch die Umsetzung einer Optimierungsmaßnahme tatsächlich eine Optimierung der Betriebssicherheit des Endlagers erzielen lässt, bleibt einer abschließenden Gesamtbewertung vorbehalten.



### **13.1 Hinweis: Erweiterung der Lichtsignalanlagen (LSA) an den Knotenpunkten mit Schrankenanlagen**

In den Betrachtungen zur bestehenden LSA wird festgestellt, dass die LSA ein Überfahren eines Rotlichtsignals zwar detektieren und anzeigen kann, allerdings keine aktiven Komponenten besitzt, die ein Überfahren verhindern können.

Die im Rahmen der Inbetriebsetzung gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Erstellung der Unterlagen der BGE ein. In Kapitel 9.3 wurden im Hinblick auf eine Schrankenanlage Hinweise zum Umfang der Dokumentation gegeben. Damit wird auf Basis der gewonnenen Betriebserfahrung eine Beurteilung ermöglicht, ob der Einsatz von Schranken in Erwägung gezogen werden sollte.

Die zusätzlichen Schrankenanlagen an den Knotenpunkten würden sich erst nach Freigabe des Streckenabschnittes öffnen und die Strecke zusätzlich zur LSA freigeben. Dies würde durch die Anbindung der Schrankenanlage an die Steuerung der LSA erfolgen (bei Rot: Schranke geschlossen [ggf. zusätzlich rote Lichtsignale auf der Schrankenanlage], bei Grün: Schranke geöffnet). Diese Schranken würden eine physikalische Barriere in der Strecke und damit im direkten Blickfeld des Fahrers darstellen. Durch diese Barriere würde das unbeabsichtigte Einfahren eines Fahrzeuges in einen gesperrten Streckenabschnitt und damit die Begegnung und Kollision mit einem beladenen Transportwagen unwahrscheinlicher gemacht werden. Durch die Nachrüstung der Schrankenanlage würde jedoch ein zusätzliches Hindernis als Gefahrenquelle in die Fahrstrecken eingebracht werden, welches bei einer weiteren Betrachtung berücksichtigt werden müsste.

Die Schrankenanlage (zusätzliche optische Barriere) am jeweiligen Knotenpunkt würde parallel zur Anzeige der LSA laufen. Damit wäre eine Signalweitergabe aus dem bestehenden System mit geringem Aufwand (ohne diese relevant anpassen zu müssen) möglich.

Ein Ausfall dieses Systems (LSA mit Schrankenanlage) würde nicht zu einem Störfall oder einem unsicheren Zustand führen. Da die Schrankenanlage an die LSA gekoppelt wäre, würden hier die gleichen Vorgaben bzgl. Wartung und Instandhaltung wie für die LSA gelten. Ein Defekt würde zur Unterbrechung des Einlagerungsbetriebs und damit hinsichtlich der Kollisionsvermeidung im Einlagerungsbetrieb zu einem sicheren Zustand führen.

### **13.2 Hinweis: Fahrerassistenzsystem zum Nahbereichsdatenaustausch**

Die Integration des Fahrerassistenzsystems zum Nahbereichsdatenaustausch wird im Vergleich zur Schrankenanlage nicht empfohlen, da der Aufwand der Implementierung deutlich größer wäre und eine aktive Kopplung der Systeme der Transportwagen mit den Systemen der LSA per Funk benötigt würde. Würde eine Schrankenanlage eingesetzt, würde dieses Fahrerassistenzsystem zum Nahbereichsdatenaustausch keinen zusätzlichen Sicherheitsgewinn liefern, da durch die Schranken die Einfahrt in gesperrte Strecken unwahrscheinlicher gemacht werden würde. Somit würde auch die Kollision von zwei Fahrzeugen weiter vermieden werden. Durch die Nachrüstung der Schrankenanlage würde ein zusätzliches Hindernis als Gefahrenquelle in die Fahrstrecken eingebracht, welches bei einer weiteren Betrachtung berücksichtigt werden müsste.



	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 89 von 97
		Stand: 19.02.2025

Wäre eine Schrankenanlage jedoch nicht umsetzbar und es würde während den Inbetriebsetzungsphasen oder während des Einlagerungsbetriebes ein Bedarf an zusätzlichen Maßnahmen zur Verhinderung von Rotlicht-Verstößen identifiziert werden, sollte das System zum Nahbereichsdatenaustausch in Betracht gezogen werden.

### **13.3 Hinweis: Integration von Lidarsensoren in den Transportwagen zur sensorbasierten Umfelderkennung zur Warnung/Information vor Kollisionen mit dem Stoß oder Hindernissen**

Zur Vermeidung von Kollisionen mit dem Stoß oder Hindernissen in der Strecke könnte die Integration von Lidarsensoren einen möglichen Sicherheitsgewinn liefern, da sie frühzeitig und auch bei ggf. schlechten Lichtverhältnissen Hindernisse erkennen und den Fahrer des Transportwagens warnen könnten.

Die im Rahmen der Inbetriebsetzung gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Erstellung der Unterlagen der BGE ein. In Kapitel 12.6.1 wurden im Hinblick auf Lidarsensoren Hinweise zum Umfang der Dokumentation gegeben. Damit wird auf Basis der gewonnenen Betriebserfahrung eine Beurteilung ermöglicht, ob der Einsatz von Lidarsensoren in Erwägung gezogen werden sollte.

Diese Empfehlung basiert auf folgenden Gründen:

- Lidarsensoren sind in der Praxis erprobt und im Untertageeinsatz bewährt, sodass hier für den geplanten Einsatz passende zuverlässige Sensoren und Systeme zur Verfügung stehen würden.
- Der mögliche Sicherheitsgewinn würde in der frühzeitigen Erkennung von Hindernissen bzw. der potentiellen Kollision mit dem Stoß liegen. Aufgrund der geringen Fahrgeschwindigkeiten des Transportwagens würde sich dem Fahrer des Transportwagens, mit Erfassen der Information durch das warnende System, ein ausreichendes Zeitfenster zur Reaktion bieten. Somit wäre das rein warnende/informierende System für einen möglichen Sicherheitsgewinn bereits ausreichend.
- Ein Ausfall dieses rein warnenden Systems würde nicht zu einem Störfall führen. Da es sich um ein rein warnendes/informierendes System handelt, könnte der Fahrer den Transportvorgang ggf. unter Berücksichtigung administrativer Maßnahmen beenden bzw. das Fahrzeug in einen sicheren Zustand überführen.
- Da das System Hindernisse erkennt, könnten auch die Schrankenanlagen (siehe 1. Punkt) erkannt werden und in Kombination zusätzlich vor einem gesperrten Streckenabschnitt warnen. Dieses System würde damit auch der Vermeidung von Berührungen der Schranke mit dem Transportwagen dienen, da es vor dieser warnen würde.
- Das passive System (Sensoren, Steuereinheit, Anzeige) könnte in die vorgesehenen Transportwagen nachgerüstet werden und würde keine Anpassung der bestehenden Planungen erfordern.
- Die Warnung durch das System würde die Aufmerksamkeit des Fahrers zielgerichtet auf das Geschehen zurücklenken, sollte es, durch die monotone Fahrt zur Einlagerungskammer, doch einmal zu Unaufmerksamkeiten kommen. Die Anzeige des Systems

könnte so gestaltet werden, dass diese nicht dauerhaft betrachtet werden müsste, sodass der Fahrer vom eigentlichen Geschehen vor sich nicht abgelenkt würde.

- Eine Ausbaustufe dieses Systems, die aktiv in die Aktorik des Transportwagens eingreifen würde, ist nicht empfehlenswert, da es unter den gegebenen Randbedingungen (bestehende Schutzmaßnahmen, Geschwindigkeitsbegrenzung der Fahrzeuge) keinen signifikanten Sicherheitsgewinn (verglichen mit dem rein warnenden System) liefern würde, jedoch einen deutlich höheren Implementierungsaufwand mit sich bringen würde sowie ein Ausfall dieses Systems das Fahrzeug stilllegen könnte. Der Sicherheitsgewinn gegenüber dem passiven System liegt in der Erkennung von Defekten am Fahrzeug. Dieser Sicherheitsgewinn ist gegenüber dem zu betreibenden Aufwand jedoch nicht zu rechtfertigen.
- Im Einlagerungsbetrieb fahren mit Abfallgebinden beladene Transportwagen nur in Vorwärtsfahrt vom Füllort zur Einlagerungskammer. Gemäß Aufgabenstellung liegt der Fokus auf der Vermeidung von Kollisionen beladener Transportwagen. Somit wäre der Bereich vor dem Transportwagen bei Vorwärtsfahrt der relevante Bereich, den es mittels Lidarsensoren zu überwachen gelte, um den Sicherheitsgewinn zu erzielen.
- Die zusätzliche Erfassung des Bereichs am Heck bzw. eine 360 Grad-Erfassung mittels zusätzlicher Lidarsensoren würden dem Fahrer weitere Informationen liefern, zum Beispiel bei der Rückwärtsfahrt in die Ausweichnische, mit denen er eine Kollision mit dem Stoß oder Hindernissen und somit eine Beschädigung an dem Transportwagen verhindern könnte. In Bezug auf die Aufgabenstellung (Vermeidung der Kollision von Fahrzeugen, die mit Abfallgebinden beladen sind), würde hiermit kein signifikanter Sicherheitsgewinn erzeugt werden.

	<b>ÜsiKo Phase 2: Maßnahmen zur Verhinderung von Kollisionen</b>	Seite: 91 von 97
		Stand: 19.02.2025

## 14. Literaturverzeichnis

- [1] Niedersächsisches Umweltministerium Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter als Anlage zur Endlagerung fester oder verfestigter radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung von 22. Mai 2002  
VDIS-KZL: 9K/1321/-/-/-/DA/ES/0001/00
- [2] DMT GmbH & Co. KG  
DSR Ingenieurgesellschaft mbH  
Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo)  
Los I: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs der Störfallanalysen  
VDIS-KZL: 9KE/25232/-/-/-/B/RB/0006/00  
Stand: 08.03.2019
- [3] Empfehlung der Entsorgungskommission  
ESK-Leitlinien für die Zwischenlagerung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung  
Revidierte Fassung vom 10.06.2013
- [4] Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE)  
Beschreibung und technische Daten der Verkehrslenkung unter Tage  
ULV-KZL: 9KE/35270/-/EBB20/-/-/JC/LA/0001/01; DokID: 11768089, ULV-Nr.: 685916  
Stand: 07.11.2017
- [5] Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE)  
Beschreibung der Überwachungs- und Sicherungseinrichtungen der Verkehrslenkung unter Tage  
ULV-KZL: 9KE/35270/-/EBB20/-/-/JC/LA/0001/01; DokID: 11768096, ULV-Nr.: 648149  
Stand: 07.11.2017
- [6] Bundesamt für Strahlenschutz  
EU 208  
Systembeschreibung Einlagerungssystem BD. 1 und 2  
VDIS-KZL: 9K /5442/-/J/TK/0002/07  
Stand: 20.02.1997
- [7] Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)  
Risikobeurteilung und Risikoanalyse – HUBTEX Stabelfahrzeug SF  
ULV-KZL: 9KE/45280/-/01ECB/-/-/JC/BZ/0001/01; DokID: 11767458, ULV-Nr.: 718420  
Stand: 15.12.2018

- [8] SAE International  
SAE J3016 „Levels of Driving Automation“  
<https://www.sae.org/news/press-room/2018/12/sae-international-releases-updated-visual-chart-for-its-%E2%80%9Clevels-of-driving-automation%E2%80%9D-standard-for-self-driving-vehicles>  
Stand: Mai 2018
- [9] Blaxtair Stereokamerasystem  
Wikimedia - <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blaxtair-mining2.jpg>  
Autor: Vianneyjeans  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [10] Gustafson, Anna  
Automation of load haul dump machines  
Luleå University of Technology, 2011
- [11] Dragt, B.J.; Camisani-Calzolari, F.R.; Craig, I.K.  
An overview of the automation of Load-Haul-Dump vehicles in an underground mining environment  
IFAC Proceedings Volumes - Volume 38, Issue 1, 2005, Pages 37-48
- [12] SANDVIK AB  
Annual Report 2000 - Sandvik Group, Page 24  
Website: <https://www.home.sandvik/490084/siteassets/3.-investors/reports-presentations/annual-reports/annual-report-2000.pdf>
- [13] Hamburger Hafen und Logistik Aktiengesellschaft  
Website: <https://hhla.de/innovation/batterie-agv>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [14] Schmachtl GmbH  
Website: <https://www.schmachtl.at/de/produkte-und-loesungen/automation/schutzeinrichtungen/>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [15] Robert Bosch GmbH  
Website: <https://www.bosch-motorsport.com/content/downloads/Raceparts/en-GB/51546379119226251.html>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [16] OpenCV Library  
Website: [https://docs.opencv.org/3.4/d9/d6a/group\\_\\_aruco.html](https://docs.opencv.org/3.4/d9/d6a/group__aruco.html)  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022

- [17] Blaxtair Inc.  
BLAXTAIR® Fußgänger- und Hinderniserkennung  
Website: <https://blaxtair.com/de/produkte/blaxtair-fussganger-hindernis-naherungserkennungskamera>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [18] Velodyne Lidar Inc.  
Velodyne Velarray H800 Solid State Lidar  
Website: <https://autonomoustuff.com/products/velodyne-velarray-h800>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [19] SICK AG  
3D Machine Vision Visionary-B  
Website: <https://www.sick.com/de/de/industrielle-bildverarbeitung/3d-machine-vision/visionary-b/c/g348851>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [20] Dotnetix Ltd.  
EDGEYE - Void and Berm Detection  
Website: <https://www.dotnetix.co.za/edgeye>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [21] SICK AG  
3D Machine Vision Visionary-T  
Website: <https://www.sick.com/be/en/machine-vision/3d-machine-vision/visionary-t/c/g358152>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [22] SICK AG  
Sichere Radarsensoren safeRS/safeRS3  
Website: <https://www.sick.com/de/de/sichere-radarsensoren/sichere-radarsensoren/saferssafers3/c/g546518>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [23] Intel Corporation  
Traffic Light Detection Using the TensorFlow\* Object Detection API  
Website:  
<https://www.intel.com/content/www/us/en/developer/articles/technical/traffic-light-detection-using-the-tensorflow-object-detection-api.html>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [24] MEKRA Lang GmbH & Co. KG  
Sichtsysteme kombiniert mit Radiofrequenz- und Radarlösungen  
Website: <https://www.mekra.de/de/sichtloesungen/baumaschinen>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022

- [25] MEKRAtronics GmbH  
Funksystem MWD T-2  
Website <https://www.mekratronics.de/de/produkte/kamerasysteme/zubehoer/funksystem/>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [26] Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)  
Ausbau des Füllorts für die zukünftige Umladestation  
Website: <https://www.bge.de/de/konrad/>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [27] Robert Bosch GmbH  
Systeme für die Innenraumbeobachtung  
Website: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/loesungen/innenraum/innenraumbeobachtung/>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [28] Valeo S.A.  
Driver Monitoring  
Website: <https://www.valeo.com/en/driver-monitoring/>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [29] D3 Engineering  
Website: <https://www.d3engineering.com/newsroom/designcore-dms-kit-features-fotonation-algorithms-ti-automotive-processors-in-production-intent-design/>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [30] Continental Engineering Services GmbH  
Driver Monitoring System – Interior Camera  
Website: <https://conti-engineering.com/driver-monitoring-system/>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [31] Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)  
Video: Schacht Konrad – vom Erzlager zum Endlager  
Website: <https://www.youtube.com/watch?v=niZqv3rUVnk>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [32] Vetter Industrie GmbH  
SmartFork ManuTel  
Website: <https://www.smartfork.com/de/smartforkr/smartforkr-manutel/>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [33] Vetter Industrie GmbH  
SmartTarget Lasersystem  
Website: <https://www.smartfork.com/de/smartforkr/smarttarget/>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022

- [34] SICK AG  
Warnsystem zur Vermeidung von Kollisionen in Tunneln  
Website:  
<https://www.sick.com/de/de/branchen/bergbau/untertagebau/fahrzeuge-fuer-den-bergbau/warnsystem-zur-vermeidung-von-kollisionen-in-tunneln/c/p362267>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [35] SANDVIK AB  
AutoMine® Concept – The Next Generation of Autonomous Mining  
Website: [https://www.youtube.com/watch?v=N4b8kD8Ej\\_c](https://www.youtube.com/watch?v=N4b8kD8Ej_c)  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [36] SANDVIK AB  
Gourley, Eric - Block cave economics [2019]  
Website: <https://solidground.sandvik/block-cave-economics/>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [37] Edmatec GmbH  
Faac Verkehrspoller J275/800 HA in Edelstahl  
Website: <https://www.edmatec.de/poller/poller-von-pilomat/poller-von-faac/>  
Datum des Zugriffs: 18.11.2022
- [38] Bundesamt für Strahlenschutz  
EU 228  
Systemanalyse Konrad, Teil 3: Ermittlung und Klassifizierung von Störfällen  
VDIS-KZL: 9K/33219/-/EB/RB/0001/04  
Stand: 24.02.1997

## 15. Anhang

Anhang 1: Liste relevanter Unterlagen für das Endlager Konrad

Nr.	Titel	KZL ; DokID ; ULV	Stand
EU000.02	Untersuchung ausgewählter Störfälle im Bergbau	VDIS-KZL: 9K/351313/-/EB/RB/0007/00	März 1984
EU226	Systembeschreibung Abruf und Einlagerungsvorgang (Verknüpfungen, Meldungen, Aufschreibungen)	VDIS-KZL: 9K/-/-/MCA/RB/0001/03	25.02.1997
EU228	Systemanalyse Konrad, Teil 3 Ermittlung und Klassifizierung von Störfällen	VDIS-KZL: 9K/33219/-/EB/RB/0001/04	24.02.1997
EU238	Systemanalyse Konrad, Teil 3 Anlagenbewertung des geplanten Endlagers	VDIS-KZL: 9K/33219/-/EB/RB/0003/01	Mai 1989
EU282	Entwurfsplanung Strahlenschutz als begleitende Planunterlage	VDIS-KZL: 9K/4424/-/LA/RB/0003/05	20.02.1997
EU303	Betriebsablauf im Bereich der Handhabung von Abfallgebinden	VDIS-KZL: 9K/5414/-/J/TK/0003/02	01.03.1995
EU324	Auslegungsanforderungen an die baulichen und maschinentechnischen Anlagen einschließlich Lüftung und Bewetterung sowie an die Handhabungs- und Transportmittel im Endlager Konrad aus den Ergebnissen der Störfallanalysen ( ET-IB-3-REV-3 )	VDIS-KZL: 9K/-/-/EB/RB/0028/04	24.02.1997
EU330	Beitrag zur Bewertung des Anlagenkonzeptes für das Endlager Konrad	VDIS-KZL: 9K/3282.30/-/EB/RB/0029/00	26.05.1988
EU358	Einlagerungssystem Komponentenspezifikation Stapelfahrzeug	VDIS-KZL: 9K/5442/-/J/TK/0009/06	20.02.1997
EU388	Administrative Maßnahmen zur Vermeidung von Störfällen und zur Verringerung möglicher Störfallauswirkungen im geplanten Endlager Konrad (ET-IB-30-REV-3)	VDIS-KZL: 9K/-/-/EBL/RB/0003/04	24.02.1997
EU469	Überschätzungsfaktor für die Strahlungsfelder an den einzelnen Arbeitsplätzen (ohne Berücksichtigung der geplanten Abschirmungen) gemäß EU72.5 im Endlager Konrad	VDIS-KZL: 9K/-/-/LBD/RB/0002/00	01.03.1993
EU072.5	Systemanalyse Konrad, Teil3 Strahlenexposition des Betriebspersonals im bestimmungsgemäßen Betrieb der Schachanlage Konrad durch äußere Bestrahlung	VDIS-KZL: 9K/33219/-/LB/RB/0009/01	April 1991



<b>Nr.</b>	<b>Titel</b>	<b>KZL ; DokID ; ULV</b>	<b>Stand</b>
SE-IB-29/08-REV-2	Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen, Stand: Dezember 2014) – Endlager Konrad	VDIS-KZL: 9KE/2211/D/ED/0001/03	18.12.2014
	DBE: Beschreibung und technische Daten der Verkehrslenkung unter Tage	ULV-KZL: 9KE/35270/-/EBB20/-/-/JC/LA/0001/01; DokID: 11768089, ULV-Nr.: 685916	07.11.2017
	DBE: Verkehrstechnisches Projekt inkl. Ablauflogik der Verkehrslenkung unter Tage	ULV-KZL: 9KE/35270/-/-/-/-/JC/SB/0001/01; DokID: 11768099, ULV-Nr.: 685920	07.11.2017