

Nachhaltigkeitsbewertung



Verlängerung U4 – Bockenheimer Warte nach Ginnheim (Stadtbahnstrecke D, Teilabschnitt 2) Erläuterungsbericht Nachhaltigkeitsbewertung Trassierungsvarianten

Dokument Nr.	BR 2311108-1
Auftraggeber	Stadtbahn Entwicklung und Verkehrs-Infrastrukturprojekte Frankfurt GmbH Mainzer Landstraße 191, 60327 Frankfurt am Main
Datum	19.09.2024 Ausfertigung: 2
Verfasser	LPI Ingenieurgesellschaft mbH Völgerstraße 9, 30519 Hannover E-Mail: begemann@lpi-ing.de Internet: www.lpi-ing.de Autor: Dipl.-Ing. Christoph Begemann, Dipl.-Ing. Daniela Eckert

Dieser Bericht umfasst 49 Seiten inkl. Deckblatt und Anhang. Jede Veröffentlichung, auch auszugsweise, bedarf der vorherigen schriftlichen Genehmigung.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	3
2	Veranlassung, Ziel und Vorgehen.....	7
3	Grundlagen Nachhaltigkeit in der Baubranche	8
3.1	Nachhaltigkeitsdefinitionen	8
3.2	Nachhaltigkeitsmodelle.....	9
3.3	Ökologische Nachhaltigkeit im Kontext der Baubranche und gesetzlichen Regulierungen	11
3.4	Nachhaltigkeitsmanagement für große Infrastrukturprojekte	13
4	Angewendete Methodik zur Nachhaltigkeitsbewertung	14
4.1	Ausgangssituation und Vorgehen	14
4.2	Herleitung der projektspezifischen Nachhaltigkeitsbewertungsmatrix / Wesentlichkeitsanalyse.....	16
4.2.1	Schritte zur Herleitung.....	16
4.2.2	Themenfindung Nachhaltigkeit	18
4.2.3	Qualitative Analyse.....	19
4.2.4	Quantitative Analyse	20
4.3	Anwendung des Bewertungssystems.....	24
4.3.1	Fachliche Bewertung	24
4.3.2	Qualitative Bewertung.....	26
4.3.3	Quantitative Bewertung	26
5	Nachhaltigkeitsziele und Ergebnis der Nachhaltigkeitsbewertung.....	28
5.1	Nachhaltigkeitsziele.....	28
5.2	Nachhaltigkeitsbewertungsmatrix „Trassierung“ - der Gesamterfüllungsgrad	30
A	Anhang.....	33

1 Kurzfassung

Die Stadtbahn Entwicklung und Verkehrsinfrastrukturprojekte Frankfurt GmbH (SBEV) verantwortet die Planung und Umsetzung des Projekts „Verlängerung U4“ zwischen den Stationen Bockenheimer Warte und Ginnheim. Neben den üblichen Projektzielen im Infrastrukturbau besteht auch in der Stadt Frankfurt der Wunsch, die Nachhaltigkeit im Projekt „Verlängerung U4“ als zusätzliches Projektziel zu verankern. Daher hat es sich die SBEV zum Ziel gesetzt, auch die Nachhaltigkeit zu integrieren. Neben einer strategischen Ausrichtung des Projektes auf dieses Ziel hin, sind auch in den Planungs- und Umsetzungsprozess Nachhaltigkeitsanforderungen und Bewertungen zu integrieren. Hierzu gehört es ebenfalls, dass Variantenentscheidungen unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit durchgeführt werden.

Derzeit werden im Rahmen einer Machbarkeitsstudie drei Varianten (1a, 1d und 3i) untersucht, aus denen mit Hilfe geeigneter Entscheidungskriterien eine Vorzugsvariante hervorgehen und festgelegt werden soll. Ein erster Schritt zur Integration der Nachhaltigkeit in das Projekt sieht daher vor, die Entscheidungsfindung auch unter dem Gesichtspunkt einer umfassenden Nachhaltigkeitsbewertung vorzunehmen. Gegenwärtig existieren jedoch für den Ingenieurbau keine allgemeingültigen, etablierten Bewertungssysteme und Methoden für eine derartige Nachhaltigkeitsbetrachtung, weshalb diese projektspezifisch zu entwickeln und festzulegen sind. Hierzu wird die SBEV durch die Nachhaltigkeitsberatung der LPI Ingenieurgesellschaft mbH unterstützt und stimmt sich in diesem Zusammenhang auch mit anderen Verkehrsinfrastrukturprojekten in Frankfurt ab, um innerhalb Frankfurts einen konsistenten Weg zu gehen. Die Nachhaltigkeitsbewertung eines derartigen Ingenieurbauwerks stellt ein Novum dar, weshalb die SBEV und das Projekt hiermit eine Vorreiterrolle für andere Infrastrukturprojekte einnehmen. Eine detaillierte Darstellung der Herangehensweise zum gewählten Vorgehen der Bewertung und der Ergebnisse kann dem nachfolgenden Bericht entnommen werden.

Auch wenn aktuell kein allgemeingültiges Bewertungssystem für den Infrastrukturbau existiert, können dennoch projektspezifische Bewertungen unter Berücksichtigung allgemein anerkannter Bewertungswege durchgeführt werden. So lassen sich Bewertungssysteme des Hochbaus (vgl. z. B. DGNB, LEED, BREAM, BNB, BiRN) als erste Basis für die Entwicklung einer Nachhaltigkeitsbewertungs- und Entscheidungsgrundlage für den Variantenentscheid der „Verlängerung U4“ heranziehen.

Die in diesen Systemen verankerte Nachhaltigkeitsdefinition, dass ein Bauvorhaben den heute notwendigen Bedarf deckt, ohne jetzige und zukünftige Generationen negativ zu beeinflussen, hat auch in Infrastrukturbauvorhaben gleichermaßen Gültigkeit. Auf Grundlage dieser Definition erfolgt daher eine Bewertung auf Basis der klassischen drei Nachhaltigkeitssäulen Ökologie (= Ökologische Qualität), Ökonomie (=Ökonomische Qualität), Soziokultur (=Sozio-kulturelle Qualität), sowie den sogenannten Querschnittsthemen Prozess (=Prozessqualität), Technik (= Technische Qualität) und Standort (=Standortqualität), vgl. Abbildung 1. Aufbauend auf diesem Nachhaltigkeitsmodell des Hochbaus, sind den Qualitäten konkrete Nachhaltigkeitskriterien (=Themen) zuzuordnen und in Entscheidungsprozessen zu bewerten (vgl. Beispiele in Abbildung 1). Die Nachhaltigkeitskriterien sind jedoch für den Ingenieur- und Infrastrukturbau nicht allgemeingültig definiert und können aktuell nur projektspezifisch gewählt werden.

Auch wenn dieser Prozess projektspezifisch erfolgt, lassen sich hier moderne, allgemein anerkannte Methoden zur Nachhaltigkeitsanalyse aus der Produkt- und Unternehmensberatung verwenden, wie z. B. der Wesentlichkeitsanalyse.



Abbildung 1: Nachhaltigkeitsmodell nach DGNB inkl. Beispielkriterien für die Qualitäten

In einem ersten Schritt wurden dazu in einem Projektteam, dass sich aus den relevanten Fachinstanzen der Stadt Frankfurt (=städtisches Kernteam) zusammensetzt, die für das Projekt wesentlichen Nachhaltigkeitsthemen zusammengetragen. Aufgrund der Verschiedenheit der Themen (=Kriterien), und der damit einhergehenden unterschiedlichen Bedeutung für die Nachhaltigkeit des Projektes, erfolgte im Zuge eines Workshops innerhalb des städtischen Kernteams zusätzlich eine Gewichtung der Themen für die Beschreibung der Gesamtnachhaltigkeit einer Variante. Die Kriterien wurden dabei einerseits hinsichtlich ihrer Relevanz für die Ökologie, die Ökonomie und die Soziokultur des Projektes und andererseits hinsichtlich der Relevanz für die Akzeptanz des Projekts bei Nutzenden und in der Öffentlichkeit bewertet. Eine Übersicht der Nachhaltigkeitskriterien und deren Gewichtung kann Abbildung 2 entnommen werden.

	Hauptthemen (=Kriterien)	Anteil Hauptthema	Anteil NH-Qualitäten
Ökologie	THG-Bilanz	6,9%	28,3%
	Ressourcenverbrauch	7,1%	
	Hydrogeologie und Grundwasser	6,4%	
	Baumbestand	7,9%	
Ökonomie	Baukosten	5,3%	14,9%
	Fördermittel	4,6%	
	Lebenszykluskosten Bauwerk	5,0%	
Soziokultur	Immission und Schallschutz	5,9%	16,7%
	Denkmalschutz	4,2%	
	Sicherheit	6,6%	
Städtebau und Standort	Städtebauliche Potenziale und Erschließung	7,3%	27,7%
	Verdichtung Stadtraum	6,1%	
	Bildung, Forschung und Entwicklung	6,7%	
	Beitrag Mobilitätswende	7,6%	
Prozesse	Baubedingte Eingriffe	6,7%	12,5%
	Bauweise	5,8%	
	Summe	100%	100%

Abbildung 2: Projektspezifische Nachhaltigkeitskriterien „U4 Verlängerung“ inklusive Zuordnung zu den Nachhaltigkeitsqualitäten und Gewichtung der einzelnen Kriterien sowie Qualitäten

Parallel zu dieser Grundlagenarbeit erfolgte eine Bewertung der drei untersuchten Trassierungsvarianten in jedem Nachhaltigkeitskriterium, indem Fachgutachten und Stellungnahmen der jeweiligen Fachbehörden berücksichtigt wurden. Im Anschluss konnte in der Regel ein relativer Vergleich der Varianten für jedes Kriterium vorgenommen werden und damit ein Ranking der Varianten zueinander erstellt werden. Unter Berücksichtigung der jeweils einzelnen Kriterienbewertungen und der Wichtung der Kriterien zueinander wurde für die verschiedenen Trassierungsvarianten eine Gesamtpunktzahl ermittelt. Mit deren Hilfe kann beschrieben werden, wie nah eine Variante dem Optimum einer bestmöglichen Erfüllung aller Kriterien kommt – auch „Gesamterfüllungsgrad“ genannt.

Aufbauend auf dem zuvor beschriebenen Bewertungsprozess wird das Gesamtergebnis für die drei untersuchten Trassierungsvarianten für das Projekt „U4 Verlängerung“ visuell nachvollziehbar in Form der aus dem Hochbau etablierten Form der „Nachhaltigkeitsblume“ in Abbildung 3 dargestellt. Die jeweiligen Kriterien sind als Segmentteile des Diagramms dargestellt, wobei die Breite der Segmente deren anteiliges Gewicht am Gesamtergebnis beschreibt. Die farbliche Füllung visualisiert, wie gut eine Variante im Vergleich zu den anderen beiden untersuchten Varianten im betrachteten Kriterium abschneidet. In der Mitte der Blume wird der Gesamterfüllungsgrad einer Variante anhand der Prozentzahl gegenüber der max. erreichbaren Punktzahl verdeutlicht.

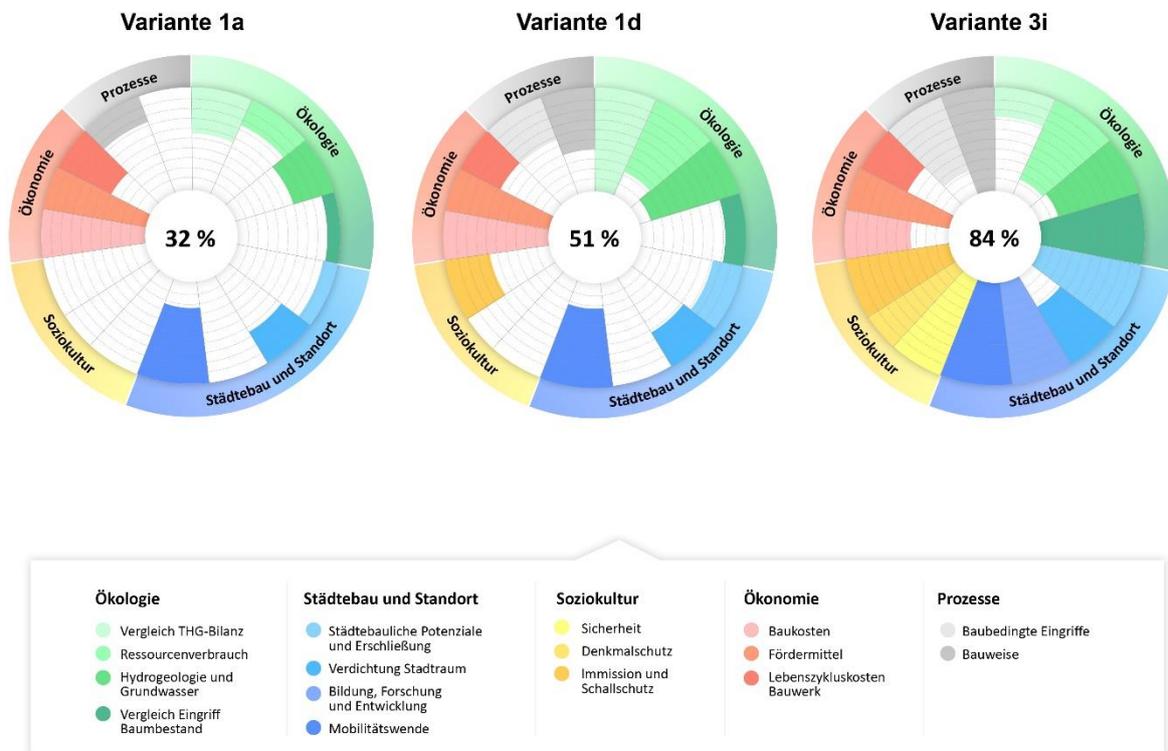


Abbildung 3: Ergebnisse der Nachhaltigkeitsbewertung der Trassierungsvarianten

Mit Hilfe der Abbildung 3 wird zunächst deutlich, dass keine der untersuchten Varianten in allen Nachhaltigkeitskriterien bestmöglich abschneidet. Insbesondere Variante 1a zeigt anhand der weißen Kriteriensegmente, dass diese Variante gegenüber den anderen Varianten Defizite aufweist. Demgegenüber erreicht die Variante 3i mit 84 % den größten Gesamterfüllungsgrad im Vergleich zu den anderen beiden Varianten. Das heißt: Unter Berücksichtigung der getroffenen projektspezifischen Auswahl an Nachhaltigkeitskriterien und deren Wertung besitzt die Variante 3i im Vergleich zu den anderen Varianten die größte Erfüllung aller Kriterien. Sie stellt somit insgesamt die nachhaltigste Variante in dieser Betrachtungsform dar. Dennoch können bei der Variante 3i Nachhaltigkeitsthemen festgestellt werden, in denen die Variante schlechter abschneidet. Sollte es zu einer Auswahl der Variante 3i kommen, wird empfohlen ein besonderes Augenmerk auf die Verbesserung der Variante in den defizitären Bereichen zu legen, um eine weitere Nachhaltigkeitsoptimierung zu erreichen.

2 Veranlassung, Ziel und Vorgehen

Die Stadtbahn Entwicklung und Verkehrsinfrastrukturprojekte Frankfurt GmbH (SBEV) verantwortet die Planung und Umsetzung des Projekts „Verlängerung U4“ zwischen den Stationen Bockenheimer Warte und Ginnheim. Neben den üblichen Projektzielen im Infrastrukturbau besteht auch in der Stadt Frankfurt der Wunsch die Nachhaltigkeit im Projekt „Verlängerung U4“ als zusätzliches Projektziel zu verankern. Daher hat es sich die SBEV zum Ziel gesetzt auch die Nachhaltigkeit zu integrieren.

Die SBEV arbeitet dafür eine projektübergreifende Nachhaltigkeitsstrategie aus. Diese beinhaltet sowohl koordinierende Maßnahmen wie die konkrete Erarbeitung von Nachhaltigkeitszielen des Projektes als auch darauf aufbauende Maßnahmen zur Umsetzung in der Planungs- und Ausführungsphase. Entsprechend sind Nachhaltigkeitsanforderungen und Bewertungen in den Planungs- und Umsetzungsprozess zu integrieren. Zur Entwicklung der Nachhaltigkeitsstrategie sowie die Integration in die Planungs- und Ausführungsprozesse wird die SBEV durch die LPI Ingenieurgesellschaft mbH unterstützt. Außerdem stimmt sich die SBEV in diesem Zusammenhang mit anderen Verkehrsinfrastrukturprojekten in Frankfurt ab, um innerhalb Frankfurts einen konsistenten Weg zu gehen. Die Nachhaltigkeitsbewertung eines derartigen Ingenieurbauwerks stellt heute allgemein noch eine Besonderheit dar, weshalb die SBEV und das Projekt hiermit eine Vorreiterrolle für andere Verkehrsprojekte einnehmen.

Im frühen Planungsprozess kommen die Nachhaltigkeitsanforderungen und Bewertung insbesondere im Rahmen von grundlegenden Variantenentscheidungen wie z. B. der Trassierung zum Tragen. Derzeit werden im Rahmen einer Machbarkeitsstudie drei Varianten (1a, 1d und 3i) untersucht, aus denen mit Hilfe geeigneter Entscheidungskriterien eine Vorzugsvariante hervorgehen und festgelegt werden soll. Um die Integration der Nachhaltigkeit bereits im Rahmen dieses Entscheidungsprozesse umzusetzen, soll für die Entscheidungsfindung der Vorzugsvariante auch eine vergleichende Nachhaltigkeitsbewertung vorgenommen werden. Eine besondere Herausforderung stellt hierbei jedoch die Tatsache dar, dass für Ingenieur- und Infrastrukturbauwerke derzeit keine allgemeingültigen, etablierten Bewertungssysteme und Methoden für eine derartige Nachhaltigkeitsbetrachtung zur Verfügung stehen. Somit kann eine entsprechende Bewertung nur projektspezifisch entwickelt und umgesetzt werden. Hierfür bedarf es eines projektspezifischen Nachhaltigkeitsbewertungssystems, welches zunächst als Grundlage für die Variantenbewertung entwickelt wurde.

Der nachfolgende Bericht beschreibt daher auch zunächst die bestehenden Grundlagen der Nachhaltigkeit im Bauwesen auf denen die Entwicklung aufbaut (vgl. Kapitel 3). Im Anschluss wird der Entwicklungsprozess für das hier entwickelte und eingesetzte projektspezifische Nachhaltigkeitsbewertungssystem dargestellt (vgl. Kapitel 4). In einem weiteren Schritt erfolgt dann die konkrete Bewertung der Varianten. Das entwickelte Nachhaltigkeitsbewertungssystem betrachtet dabei zunächst die einzelnen projektspezifisch relevanten Nachhaltigkeitsthemen durch entsprechende Kriterien. Deren Bewertung erfolgt auf Grundlage von Fachgutachten und Fachstellungen. Abschließend überführt das Bewertungssystem die Einzelbewertungen in eine Gesamtbewertung der Nachhaltigkeit der jeweiligen Varianten, die miteinander verglichen werden können. Die Durchführung und Ergebnisdarstellung der Bewertung stellt den zweiten und abschließenden Teil dieses Berichtes dar, vgl. Kapitel 5.

3 Grundlagen Nachhaltigkeit in der Baubranche

3.1 Nachhaltigkeitsdefinitionen

„Eine nachhaltige Entwicklung ist eine Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, daß künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können.“

Dieses Zitat ist dem *Brundtland-Bericht* entnommen, der 1987 mit dem Titel „Unsere gemeinsame Zukunft“ von der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen veröffentlicht wurde [U 1]. Die Veröffentlichung gilt als Beginn des weltweiten Diskurses über das Thema Nachhaltigkeit und ist eine der am häufigsten zitierten Werke der Umwelt- und Entwicklungsliteratur. Angestoßen durch die Publikation erfolgte 1989 die Einberufung der Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung, die drei Jahre später in Rio de Janeiro stattfand und auch als *Rio-Konferenz* bekannt ist. Auch die Ursprünge der Agenda 21 gehen auf den Brundtland-Bericht zurück. Mit Hilfe der Agenda 21 sollen die Inhalte des Brundtland-Berichts in internationales Handeln umgesetzt werden.

Die eigentlichen Ursprünge des Begriffs Nachhaltigkeit reichen jedoch weiter zurück. Bereits im Jahr 1713 tauchte der Begriff Nachhaltigkeit erstmals im Kontext der Forstwirtschaft auf, die zu diesem Zeitpunkt mit Holzverknappung und Ausbeutung der Wälder zu kämpfen hatte. Der Oberberghauptmann Hans Carl von Carlowitz nahm sich dieser Herausforderung an und formulierte in seinem Werk *„Sylvicultura oeconomica“*, dass nur so viel Holz geschlagen werden soll, wie durch Aufforstung wieder nachwachsen kann. Dadurch soll eine fortwährende Erhaltung des Baumbestandes erreicht und ein regeneratives, natürliches System gesichert werden. Im Kontext der post-industriellen Gesellschaft nimmt der Begriff der Nachhaltigkeit nun seit Jahrzehnten an Bedeutung zu, wobei sich nach wie vor auf die oben dargestellte Definition im Brundtland-Report im Allgemeinen bezogen wird.

Eine weitere Definition erfolgt in der Regel fachspezifisch. Überträgt man diese allgemeinen Grundüberlegungen auf Projekte im Bausektor, kann nachhaltiges Bauen wie folgt beschrieben werden: Zukunftsgerechte Bauvorhaben sind so zu planen und zu errichten oder zu modernisieren, dass sie gleichermaßen wirtschaftlich und klimagerecht sind sowie durch eine gute Qualität eine lange Lebensdauer und hohe soziale Qualität aufweisen, sodass sie damit den gegebenen Bedarf decken. Neben einer ressourcenschonenden, energieeffizienten Bauweise spielen demnach auch Aspekte der Wirtschaftlichkeit, Dauerhaftigkeit und der Sozialverträglichkeit eine wesentliche Rolle.

Im Falle eines Infrastrukturbauwerkes zeichnet sich der notwendige Bedarf in der Herstellung, Erweiterung oder Umbau einer neuen oder bestehenden Anlage aus, die damit auf ein verändertes in der Regel gestiegenes Verkehrsaufkommen reagiert und damit die Attraktivität z. B. eines schienengebundenen Systems steigert und zur Verkehrswende beitragen kann. Diese Erfüllung des Bedarfes unter ökologischen, ökonomischen und sozio-kulturellen Randbedingungen so auszugestalten, dass aktuelle und zukünftige Generationen in den verschiedenen Dimensionen möglichst gering belastet werden, stellt die zentrale Aufgabe des nachhaltigen Planen und Bauens im Infrastrukturbau dar.

Auf dieser Grundlage ist es das Ziel im konkreten Projekt der Verlängerung der U4 insbesondere die ökologischen Auswirkungen zu reduzieren und gleichzeitig den notwendigen Bedarf bestmöglich zu erfüllen. Entsprechend sind neben ökologischen Anforderungen (z. B. Reduzierung von THG-Emissionen)

auch die weiteren Anforderungen, die sich u.a. aus dem Bedarf an diese Einrichtung ergeben, zu berücksichtigen.

3.2 Nachhaltigkeitsmodelle

Zur Bewertung der Nachhaltigkeit bedarf es entsprechender Modelle und Konzepte. Ein in Wirtschaft und Finanzen häufig verwendetes Modell ist das sogenannte *Drei Säulen Modell*, das 1998 im Abschlussbericht der Enquete Kommission des Deutschen Bundestages „Schutz des Menschen und der Umwelt – Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltigen zukunftsverträglichen Entwicklung“ vorgestellt wurde [U 2]. Demnach sind Ökologie, Wirtschaft und Soziales gleichrangig und gleichgewichtet zu bewerten, vgl. Abbildung 4.

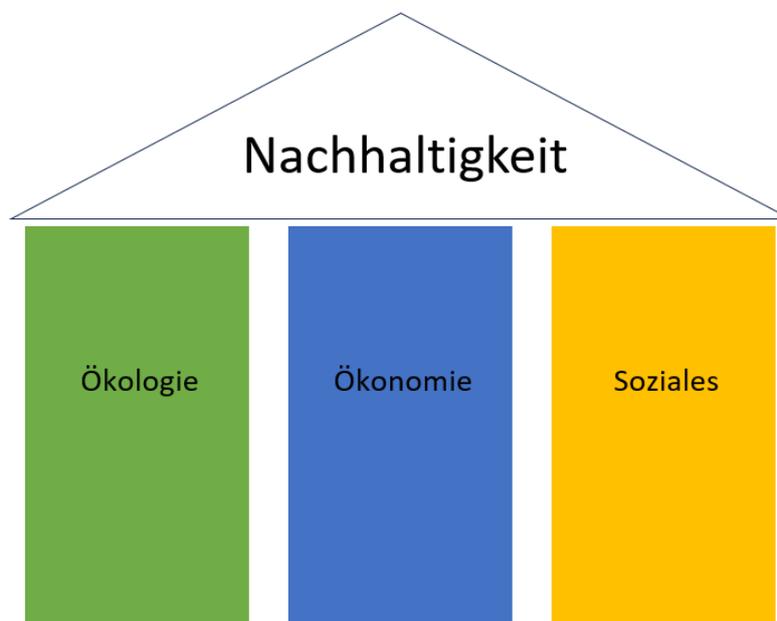


Abbildung 4: Drei Säulen Modell der Nachhaltigkeit

Nachhaltigkeitsmodelle werden gelegentlich abgeändert sowie weiterentwickelt, um sie beispielsweise an individuelle Aufgaben- und Problemstellung anpassen zu können. Im Bereich des Hochbaus existieren mittlerweile verschiedene Bewertungssysteme, die sich jedoch ebenfalls auf das *Drei Säulen Modell* beziehen. Als bekannte Systeme in Deutschland sind hier z. B. DGNB, BiRN, BNB zu nennen, vgl. z. B. [U 3], [U 4], [U 5]. Etablierte System, wie z. B. das der Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) [U 3], ergänzen ihre Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden durch zusätzliche Querschnittssäulen, die für die operative Anwendung des Systems Vorteile bieten. Im Folgenden wird der Nachhaltigkeitsansatz inklusive des dazugehörigen Modells der DGNB detaillierter erläutert.

Das *Drei Säulen Modell* bildet die Basis des Nachhaltigkeitsmodells der DGNB, bestehend aus Ökologie, Ökonomie und Sozialem. In der Säule *Ökologie (Ökologische Qualität)* sind Aspekte des ressourcen- und umweltschonenden Bauens angeführt. Hierunter fallen beispielsweise die Themen Schad- und Risikostoffe, eine klimafreundliche Bauweise oder die Förderung von Biodiversität. In der Säule *Ökonomie*

(*Ökonomische Qualität*) liegt ein starker Fokus auf die Wirtschaftlichkeit der Gebäude über den gesamten Lebenszyklus. Auch Themen wie Wertstabilität und Flexibilität für zukünftige Veränderungen, die eine Langfristige Nutzung verbessern sollen, sind hier angeführt. Ziel ist eine möglichst allumfassende wirtschaftliche Betrachtung zu erreichen. In der Säule *Soziales (Soziokulturelle und funktionale Qualität)* steht der Mensch mit seinen Bedürfnissen und Ansprüchen an die Nutzung des Bauwerkes im Fokus. Konkret werden Themen wie Komfort, Wohlbefinden und die Erhaltung der Gesundheit der Nutzenden adressiert [U 3].

Um das Nachhaltigkeitsmodell möglichst nah an der Baupraxis zu gestalten, wird das klassische Drei Säulen Modell um die drei Querschnittsthemen *Prozesse, Technik und Standort* erweitert, vgl. Abbildung 5 und [U 3]. Ein derartiges Vorgehen ist auch in anderen Nachhaltigkeitsbewertungssystemen des Hochbaus üblich, vgl. z. B. [U 4]. Die Anzahl der Querschnittsthemen kann hier jedoch variieren. Ziel der Querschnittsthemen ist es, die Aspekte der Nachhaltigkeit auch in den konkreten Planungs- und Ausführungsprozess zu integrieren. Eine besondere Rolle kommt hierbei dem Querschnittsthema *Prozesse (Prozessqualität)* zu. Hier sind beispielsweise Kriterien der Qualitätssicherung über die komplette Projektlaufzeit hinweg angeführt. Unter *Technik (Technische Qualität)* sind Themen wie Rückbaubarkeit und Recyclingfähigkeit adressiert und unter dem Querschnittsthema *Standort (Standortqualität)* sind Aspekte zur Verkehrsanbindung und Nähe zu nutzungsrelevanten Einrichtungen zu finden. In Abbildung 5 ist das Nachhaltigkeitsmodell der DGNB zur Bewertung von Gebäuden grafisch dargestellt.

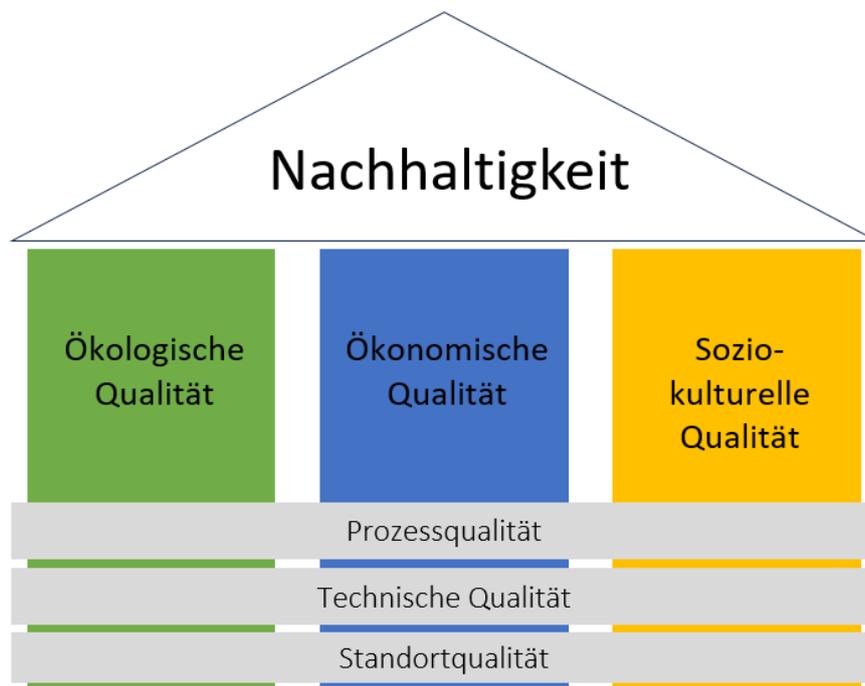


Abbildung 5: Nachhaltigkeitsmodell im Bauwesen in Anlehnung an DGNB-Systematik

Das Modell basiert auf dem Grundsatz, die drei Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales möglichst gleichwichtig und gleichberechtigt zu betrachten, um Einschränkungen einer oder mehrerer Dimensionen in ihrer Funktion durch eine ungleiche Gewichtung zu vermeiden.

An den Querschnittsthemen ist erkennbar, dass die etablierten Bewertungssysteme den kompletten Entwicklungsprozess eines Hochbauwerkes im Blick haben. Die Anwendung der Querschnittsthemen

sieht damit auch eine vollständige Begleitung über den kompletten Planungs- und Ausführungsprozess vor. Sie dienen damit neben der konkreten Bewertung der tatsächlichen Nachhaltigkeitsqualität (z. B. durch die Ökobilanzierung, den ressourcenschonenden Materialeinsatz, die Lebenszykluskostenoptimierung) auch der konkreten Steuerung des Prozesses. So können Punkte gesammelt werden, indem man sich zu ausgewählten Projektzeitpunkten mit wichtigen Nachhaltigkeitsthemen auseinandersetzt. Kommt es jedoch zu einem bestimmten Projektzeitpunkt zu einer Bewertung des aktuellen Entwurfs oder einer Variantenbetrachtung, dann ist es vorteilhaft, die betrachteten Nachhaltigkeitsqualitäten auf die zu diesem Zeitpunkt relevanten Punkte einzugrenzen. Denn nicht zu jedem Zeitpunkt und nicht für jeden Entwicklungsschritt sind alle Aspekte relevant. Insbesondere in frühen Projektphasen mit Grundsatzentscheidungen liegt auch für Detailspekte (z. B. in der Gebäudeausstattung) keine ausreichende Detailtiefe vor. Für diese Entscheidungsfindung werden in der Regel die relevante Bewertungskriterien aus dem Bewertungssystem aufgegriffen und konkret bewertet und gegenübergestellt. Ziel ist es in diesem Fall, den bestmöglichen Gesamterfüllungsgrad der relevanten Kriterien zu erreichen.

Für eine Nachhaltigkeitsbewertung im Ingenieurbau kann die Betrachtung über das „Drei Säulen Modell“ inkl. ausgewählter Querschnittsthemen aufgegriffen und adaptiert werden. Die in den jeweiligen Säulen enthaltenen und zu bewertenden Kriterien sind jedoch anzupassen. Wenn Nachhaltigkeitsbewertungen angewendet werden, sollte auch dazwischen unterschieden werden, ob eine Bewertung zu einem gewissen Zeitpunkt, z. B. im Rahmen einer Variantenentscheidung, erfolgt oder ob das Bewertungssystem als Managementtool den Entwicklungsprozess eines Bauvorhabens begleitet und damit auch steuernde Elemente enthalten sollte. Für Ersteres sind die konkreten zu einem Projektzeitpunkt relevanten Nachhaltigkeitsthemen zu diagnostizieren und zu bewerten. Für den zweiten Fall ist zusätzlich zu klären, welche Gesamtmerkmale der Nachhaltigkeit ein Bauvorhaben zu einem nachhaltigen Bauvorhaben machen und welche wichtigen, prozesslichen Schritte diese Entwicklung begünstigen. Diese sind entsprechend ebenfalls im Bewertungssystem als eine Art Qualitätssicherungsinstrument zu verankern.

3.3 Ökologische Nachhaltigkeit im Kontext der Baubranche und gesetzlichen Regulierungen

Auch wenn die Nachhaltigkeit mehrdimensional zu betrachten ist, wird häufig im betrachteten Kontext ein besonderes Augenmerk auf die ökologische Nachhaltigkeit gelegt. Dies gilt auch für den Ingenieur- und Infrastrukturbau, vgl.[U 7]. Diese Entwicklung entstammt einer globalen Entwicklung von ökologischen Nachhaltigkeitszielen.

Im Jahr 2020 hat die Europäische Kommission den *European Green Deal* eingeführt, um Europas Beitrag zum *Pariser Klimaabkommen* – und damit zum 1,5-Grad-Ziel – voranzutreiben. Ziel ist die Klimaneutralität der Europäischen Union bis 2050 bei gleichzeitiger Transformation der europäischen Wirtschaft hin zu mehr Nachhaltigkeit, Ressourcen- und Klimaschutz. Die *EU-Taxonomie* (Taxonomie-Verordnung) leistet dabei einen entscheidenden Beitrag zum *Green-Deal*. Es handelt sich hierbei um ein wissenschaftlich fundiertes Instrument zur einheitlichen Bewertung wirtschaftlichen Handelns anhand ökologischer Kriterien. Als bedeutender Teil der nachhaltigen Finanzaktivitäten der EU zielt die Taxonomie darauf ab, nachhaltige Investitionen sowie deren Transparenz zu fördern. Um die Klimaziele zu erreichen, muss insbesondere der energie- und ressourcenintensive Bausektor transformiert werden. Die EU-Taxonomie

hat somit unweigerlich eine Auswirkung auf die Baubranche und erhöht erheblich die Nachfrage nach Objekten, die taxonomiekonform sind. Dies gilt für Investoren und Immobilieneigentümer gleichermaßen. Die Grundlage der EU-Taxonomie bilden die *sechs Umweltziele*: Klimaschutz, Anpassung an den Klimawandel, nachhaltige Nutzung und Schutz von Wasser und Meeresressourcen, Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft, Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung sowie Schutz und Wiederherstellung der Biodiversität und der Ökosysteme. Trotz der Etablierung unterschiedlicher Bewertungssysteme und sogenannter „Green Labels“, konnte bis dato keine einheitliche Bewertungsgrundlage auf europäischer Ebene geschaffen werden. Die EU-Taxonomie nimmt sich dieser Herausforderung an und schafft eine erste Grundlage anhand derer eine einheitliche Bewertung ermöglicht werden soll. Um die *EU-Taxonomie* zu erfüllen, muss die Wirtschaftsaktivität einen wesentlichen Beitrag zur Verwirklichung eines (oder auch mehrerer) der definierten Umweltziele liefern. Gleichzeitig darf die Aktivität kein anderes Umweltziel negativ beeinträchtigen und soziale Mindeststandards müssen eingehalten werden.

Knapp 40 % der weltweiten CO₂-Emissionen gehen auf den Bausektor zurück, weshalb das THG-Reduktionspotential entsprechend groß ist. Neben der Klimawirkung sind als wichtige ökologische Kriterien der Ressourcenverbrauch, das Abfallaufkommen als auch Eingriffe in Ökosysteme zu nennen. Die Baubranche wird sich ihrer Tragweite und somit ihrer Verantwortung mehr und mehr bewusst und rückt das Thema Ökologie zunehmend in den Mittelpunkt. Die Berücksichtigung ökologischer Kriterien ist - bedingt durch die EU-Taxonomie - Grundvoraussetzung, um Zugang zu nachhaltigen Finanzmitteln zu erlangen.

Neben den Veränderungen auf europäischer Ebene sind auch nationale Klimaschutz- und Ressourcenschutzziele entstanden, die sich in der Regulatorik widerspiegeln. Eine wichtige Rolle spielt in diesem Zusammenhang auch das Klimaschutzgesetz (KSG). Darin verankert im §13 ist das Gleichberechtigungsgesetz und damit die Vorgabe, dass bei der Bewertung von möglichen Umsetzungsvarianten auch die Klimarelevanz zu berücksichtigen ist.

Diese gesetzliche Regelung führt dazu, dass Anforderungen an den Ressourcen- und Klimaschutz verbindlich in die Projektpraxis einzubeziehen sind. Bislang stellte die eigenständige Berücksichtigung solcher Anforderungen für die Verantwortlichen meist eine besondere Hürde dar, da die Umsetzung zusätzliche finanzielle Mittel bedurfte. Diese Mittel waren im Sinne der Wirtschaftlichkeit des Projektes aufgrund fehlender regulatorischer Vorgaben kaum begründbar.

Andererseits verpflichten die gesetzlichen Regelungen die Verantwortlichen dazu, diese Anforderung in die Bewertung der Projekte und der umgesetzten Lösungen einzubinden. Dies kommt insbesondere dann zum Tragen, wenn entsprechende Entscheidungen zwischen Varianten zu treffen sind. Dabei können die Umwelteinflüsse jedoch nicht alleine betrachtet werden, da unterschiedliche Varianten in der Regel weitere Vor- und Nachteile in anderen notwendigen Qualitäten mitbringen. Dementsprechend ist die Entscheidungsfindung hier eine Abwägungsentscheidung zwischen den verschiedenen Vor- und Nachteilen der betrachteten Varianten. An dieser Stelle kann die Nachhaltigkeitsbewertung eine wichtige Lücke schließen, um diesen Entscheidungsprozess zu unterstützen. Neben den Umweltbelangen und Auswirkungen können auch die weiteren Anforderungen oder der Bedarf durch die weiteren Säulen und Querschnittsthemen beschrieben werden. Durch diesen Abwägungsprozess lässt sich die Lösung mit der bestmöglichen Erfüllung aller Projektanforderungen ermitteln.

3.4 Nachhaltigkeitsmanagement für große Infrastrukturprojekte

Wie bereits eingangs dargestellt, besteht zwar ein großer Wunsch, Nachhaltigkeitsanforderungen in Ingenieur- und Infrastrukturprojekte zu integrieren, jedoch existiert im Vergleich zum Hochbau kein allgemeingültiger Standard. Dementsprechend ist auch die Anforderung, die an ein nachhaltiges Infrastrukturbauprojekt gestellt wird, nicht eindeutig definiert und geregelt, sondern muss projektspezifisch definiert werden. Die vorherigen Ausführungen haben auch gezeigt, dass dies möglichst früh im Projekt erfolgen muss und dass es einer ganzheitlichen Betrachtung des Projektes bedarf. Daher ist es zu empfehlen, dass die relevanten Nachhaltigkeitsthemen eines Projektes bereits im Rahmen der Grundlagenermittlung und der Projektierung erarbeitet werden. Dabei ist u.a. zu bewerten, welchen Einfluss ein Projekt durch seine Herstellung, dessen Nutzen und ggf. dessen Rückbau auf die verschiedenen Säulen der Nachhaltigkeit hat. Darauf aufbauend muss es das Ziel sein, entsprechende negative Auswirkungen zu reduzieren, während der notwendige Bedarf an das Bauwerk, z. B. Transport von Personen, Güter etc., gedeckt bzw. bestmöglich optimiert wird. Auch wenn diese Bewertung und Steuerung derzeit keinen standardisierten Vorgaben folgt, birgt es die Möglichkeit, auch die besonderen Randbedingungen, die bei Infrastrukturprojekten deutlich vielfältiger sein können als im Hochbau, zu betonen. Wenn die Entwicklung der relevanten Themen darüber hinaus mit einer anerkannten Methodik erfolgt, kann dies sogar einem standardisierbarem Vorgehen folgen.

Die Ergebnisse dieser Projektbewertungen können in einer übergeordneten, projektweiten Nachhaltigkeitsstrategie zusammengefasst werden, in der die Nachhaltigkeitsziele näher definiert und die für das Projekt notwendigen Maßnahmen zur Umsetzung beschrieben werden. Die Maßnahmen können sowohl organisatorische Bausteine wie die Durchführung von Bilanzen zur Datenerhebung, als auch die konkrete Umsetzung von technischen Maßnahmen (Nutzung von ressourcenschonenden oder THG-armen Baustoffen etc.) beinhalten. Aus dieser Strategie leiten sich für das Projekt somit auch konkrete Arbeitsschritte ab, wie z. B. die Integration der Nachhaltigkeitsbewertung im Rahmen von Variantenbetrachtungen. Die Methode der Nachhaltigkeitsstrategieentwicklung wird bereits seit geraumer Zeit im Rahmen der Unternehmensentwicklung genutzt und kann in Teilen auch für Bauvorhaben genutzt werden.

In Ingenieurbauvorhaben gibt es bereits verschiedene Projekte, die sich gewissen Nachhaltigkeitszielen verschrieben haben. Ein besonderer Fokus liegt hier neben der Erfüllung der technischen Anforderungen und der Kosten und Bauzeitoptimierung auch auf der Reduzierung von ökologischen Auswirkungen, wie der Reduzierung der THG-Emissionen. Im Rahmen verschiedener Neubauvorhaben wird daher die Reduzierung der THG-Emissionen bei der Herstellung des Bauwerkes besonders bewertet, mit konkreten Maßnahmen verfolgt und im Anschluss evaluiert, vgl. z. B. das Neubauprojekt der U5 in Hamburg [U 7]. In weiteren Projekten wird die THG-Bilanzierung als Teil der Variantenbewertung herangezogen, aber auch hier weiteren Kriterien zur gesamtheitlichen Bewertung der Varianten gegenübergestellt, vgl. z. B. Kapazitätserweiterung Ost-West-Achse Stadtbahn Köln [U 8], [U 11]. In weiteren Projekten auch im Frankfurter Raum werden ausgehend von einer konkreten Nachhaltigkeitsstrategie entsprechende Projektziele für das Projekt verfolgt, vgl. z. B. Fernbahntunnel Frankfurt [U 9].

4 Angewendete Methodik zur Nachhaltigkeitsbewertung

4.1 Ausgangssituation und Vorgehen

Die vorangestellten Grundlagen zeigen auf, dass es sinnvoll und notwendig ist, die Nachhaltigkeitsbewertung in entsprechende Entscheidungsprozesse zu integrieren. Die verschiedenen Varianten sind dafür mit Hilfe eines Nachhaltigkeitsbewertungssystems anhand projektspezifischer Nachhaltigkeitsthemen, die den drei Säulen der Nachhaltigkeit zuzuordnen sind, zu bewerten. Nach Bewertung der einzelnen Varianten kann eine Vorzugsvariante ermittelt werden, die die bestmögliche Erfüllung der Nachhaltigkeitsthemen (=Kriterien) bietet und weiter beplant wird. Der dafür erforderliche Prozess ist in Abbildung 6 in vertikaler Richtung dargestellt.

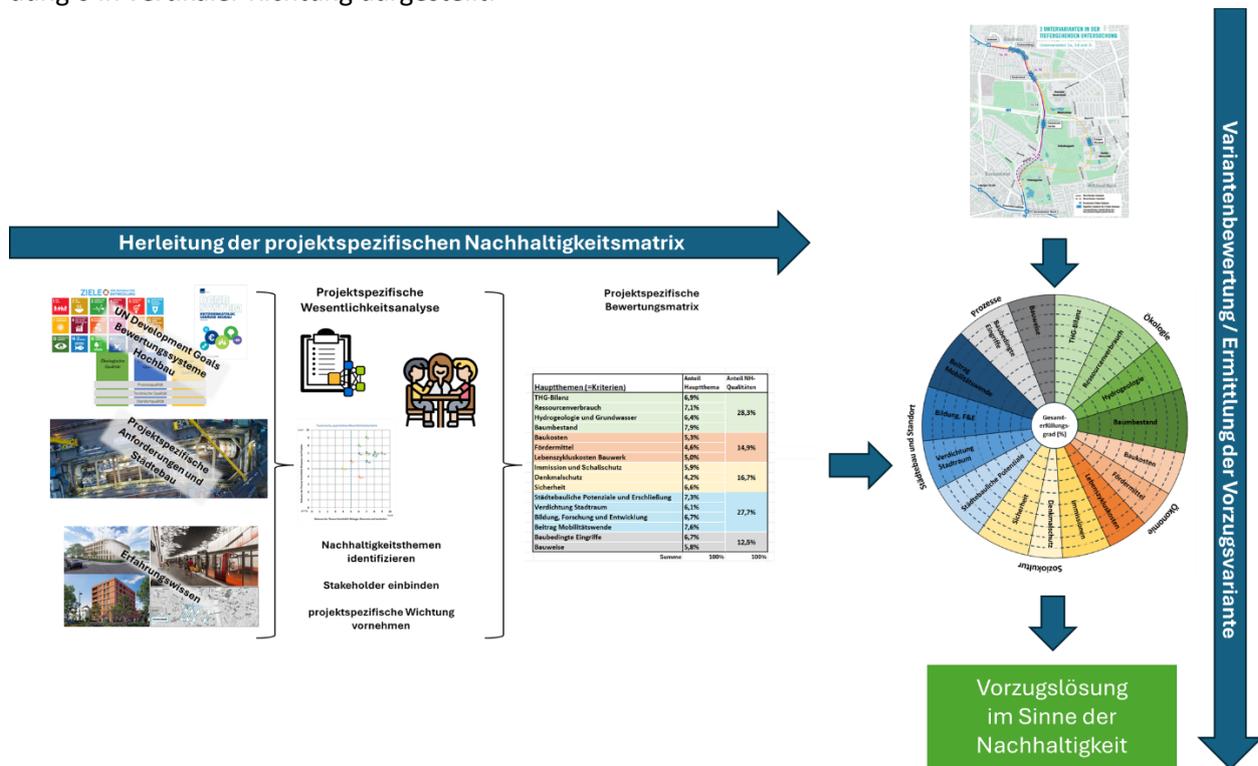


Abbildung 6: Prozessschema - Angewandte Methodik zur Nachhaltigkeitsbewertung

Leider existiert für den Infrastrukturbau aktuell kein allgemeingültiges Bewertungssystem, das die Anforderungen an eine nachhaltige Lösung beschreibt und an der die aktuellen Varianten im Projekt „Verlängerung U4“ gemessen werden könnten. Dennoch kann an dieser Stelle eine projektspezifische vergleichende Bewertung erfolgen, wofür zunächst ein projektspezifisches Bewertungssystem entwickelt werden muss. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Auswahl der relevanten Nachhaltigkeitsthemen (=Kriterien) zur Bewertung dar. Diese können sich aus übergeordneten nationalen oder internationalen Nachhaltigkeitszielen, regulatorischen Anforderung (vgl. z. B. Klimaschutzgesetz (KSG)) und/oder spezifischen örtlichen Anforderungen an Projekte zusammensetzen, vgl. z. B. [U 10]. Übergeordnetes Ziel ist es, mit Hilfe der Kriterien einerseits den Bedarf sowie die Anforderungen an die Infrastrukturanlage zu beschreiben und andererseits die Auswirkungen einer möglichen Umsetzung zum Beispiel auf die örtliche Umwelt, das Klima und die Nutzenden und Betroffenen mitzubewerten.

Als standardisierbare und verallgemeinerbare Methode zur Erarbeitung eines projektspezifischen Nachhaltigkeitsbewertungs- und Entscheidungssystems für den Variantenentscheid der „Verlängerung U4“ wird eine durch die LPI Ingenieurgesellschaft für den Ingenieurbau entwickelte Vorgehensweise verwendet (horizontaler Weg in Abbildung 6). Dieses Verfahren basiert auf üblichen Grundlagen der Nachhaltigkeitsbewertung des Hochbaus (z. B. Drei Säulen Modell inkl. Querschnittsthemen, vgl. Abbildung 5) und wird durch adaptierte Methoden aus der Unternehmensberatung zur Nachhaltigkeitsstrategieentwicklung (Wesentlichkeitsanalyse) ergänzt.

Die Vorgehensweise erlaubt es, in einem projektspezifischen Abstimmungsprozess die für das Projekt und den Variantenentscheid relevanten Nachhaltigkeitsthemen zu identifizieren. Diese können auch die für ein Infrastrukturprojekt häufig sehr individuellen Anforderungen berücksichtigen (wie z.B. verschiedene Bauwerkstypen, örtliche Randbedingungen). Im Anschluss können diese Nachhaltigkeitsthemen als projektspezifische Bewertungskriterien in eine projektspezifische Bewertungsmatrix für die Variantenentscheidung überführt werden.

Nach Herleitung des projektspezifischen Bewertungssystems kann die eigentliche vergleichende Bewertung der zur Verfügung stehenden Varianten erfolgen. Dazu sind die Varianten mit Hilfe der Kriterien zu bewerten. In der Regel kommen für diese Arbeit Fachgutachten und Fachstellungen zum Einsatz. Da üblicherweise keine definierten Grenzwerte für die Kriterien existieren, welche zur Bewertung herangezogen werden, erfolgt die Bewertung in der Regel durch einen Vergleich der Varianten zueinander. Diese vergleichende Bewertung der Varianten kann in einer Gesamtbewertung zusammengeführt werden und liefert nach finaler Auswertung und Gesamtbewertung eine Vorzugsvariante im Sinne der Nachhaltigkeit.

Die nachfolgenden Kapitel beschreiben zunächst die Herleitung des projektspezifischen Bewertungssystems für den Variantenentscheid (horizontaler Weg in Abbildung 6). Im Anschluss wird die eigentliche Bewertung der Varianten dargestellt (vertikaler Weg in Abbildung 6). Zum Abschluss erfolgt dann die konkrete Gegenüberstellung der Ergebnisse dieser vergleichenden Nachhaltigkeitsbewertung.

4.2 Herleitung der projektspezifischen Nachhaltigkeitsbewertungsmatrix / Wesentlichkeitsanalyse

4.2.1 Schritte zur Herleitung

Bevor mit einer konkreten Bewertung der Varianten begonnen werden kann, ist es erforderlich, ein projektspezifisches Nachhaltigkeitsbewertungssystem für die Variantenuntersuchung aufzubauen. Dafür wird eine Verfahrensweise herangezogen, die durch die LPI Ingenieurgesellschaft mbH entwickelt wurde. Generelles Ziel des Vorgehens ist es, die für ein Projekt relevanten Nachhaltigkeitsthemen mit Hilfe von Nachhaltigkeitskriterien in einer Nachhaltigkeitsmatrix zusammenzustellen. Als Grundlage für die Herleitung des Bewertungssystems kann auf das klassische Drei Säulen Modell der Nachhaltigkeit zurückgegriffen werden. Da jedoch die darunter zu sammelnden Nachhaltigkeitsthemen nicht definiert sind, müssen diese hergeleitet werden. Ähnlich zu anderen Bewertungssystemen des Hochbaus können sich diese aus internationalen und nationalen Nachhaltigkeitszielen, projektspezifischen Anforderungen oder auch Erfahrungswissen herleiten. Im Ingenieur- und Infrastrukturbau können sich die Nachhaltigkeitsthemen lokal und abhängig von Projekt und Bauobjekt stark unterscheiden, sodass eine eindeutige Festlegung schwerfällt. Eine derartige Herausforderung ist auch aus der Produkt- und Unternehmensberatung bekannt, bei denen teilweise sehr unterschiedliche Systeme zu bewerten sind, sodass für diese jeweils die relevanten Nachhaltigkeitsthemen zu identifizieren sind, um die Nachhaltigkeit zu bewerten und ggf. zu steigern. Die dabei verwendete Wesentlichkeitsanalyse zur Identifizierung der Themen kann auch im Bauwesen und damit für die Herleitung der Nachhaltigkeitsbewertungsmatrix im Projekt „Verlängerung der U4“ genutzt werden.

Aufgrund der Tatsache, dass das Prinzip der Wesentlichkeitsanalyse generell nicht allgemein bekannt ist, wird im Folgenden näher darauf eingegangen. Die Wesentlichkeitsanalyse ist ein Verfahren, welches sich Unternehmen zunutze machen, um jene Themen zu identifizieren und zu priorisieren, die für die Bewertung der Nachhaltigkeit des Unternehmens aus eigener Sicht und auch Sicht ihrer Stakeholder und deren Umfeld besonders relevant sind. Dabei werden sowohl interne Perspektiven (=Inside-Out Perspektive), als auch externe Perspektiven (=Outside-In Perspektiven) berücksichtigt. Bei einer Analyse nach dem Prinzip der Inside-Out Perspektive geht es darum, welche erheblichen Auswirkungen die eigene Geschäftstätigkeit auf die Umwelt, die Gesellschaft und die Wirtschaft hat. Im Gegensatz dazu wird bei einer Analyse nach dem Prinzip der Outside-In Perspektive die Erheblichkeit der Auswirkungen des Handelns auf Umwelt und Gesellschaft auf den (finanziellen) Unternehmenserfolg betrachtet. Das übergeordnete Ziel dieser Analyse ist es, den Fokus auf jene Bereiche zu lenken, die den größten Einfluss auf die Nachhaltigkeit des Unternehmens oder der Produkte haben und diese Bereiche gezielt zu optimieren, was sowohl die Nachhaltigkeit des Unternehmens als auch dessen Erfolg verbessern bzw. sichern soll.

Für die Erarbeitung der projektspezifischen Nachhaltigkeitsbewertungs- und Entscheidungsgrundlage für den Variantenentscheid „Verlängerung U4“ wurde die Methode entsprechend adaptiert. Die Adaption war nötig, da teilweise signifikante Diskrepanzen dahingehend bestehen, was ein erfolgreiches Infrastrukturprojekt und was ein erfolgreiches Unternehmen ausmacht. So ist es üblich, den Erfolg eines Unternehmens anhand dessen monetärer Situation zu bewerten. Der Erfolg eines Verkehrsinfrastrukturprojekts ist hingegen primär an dessen Möglichkeit der Deckung des Bedarfs und der Akzeptanz bei

Nutzenden und in der Öffentlichkeit zu bewerten. Aus diesem Grund wurde das Prinzip der Outside-In Perspektive dahingehend angepasst, dass die Akzeptanz des Projekts bzw. der projektspezifischen Themen bei den Nutzenden und in der Öffentlichkeit in den Mittelpunkt der Analyse rückt und nicht der finanzielle Projekterfolg, wenngleich dieser im Zuge der Nachhaltigkeitsbewertung miteinfließt. Das Prinzip der Inside-Out Perspektive wurde hingegen direkt übernommen.

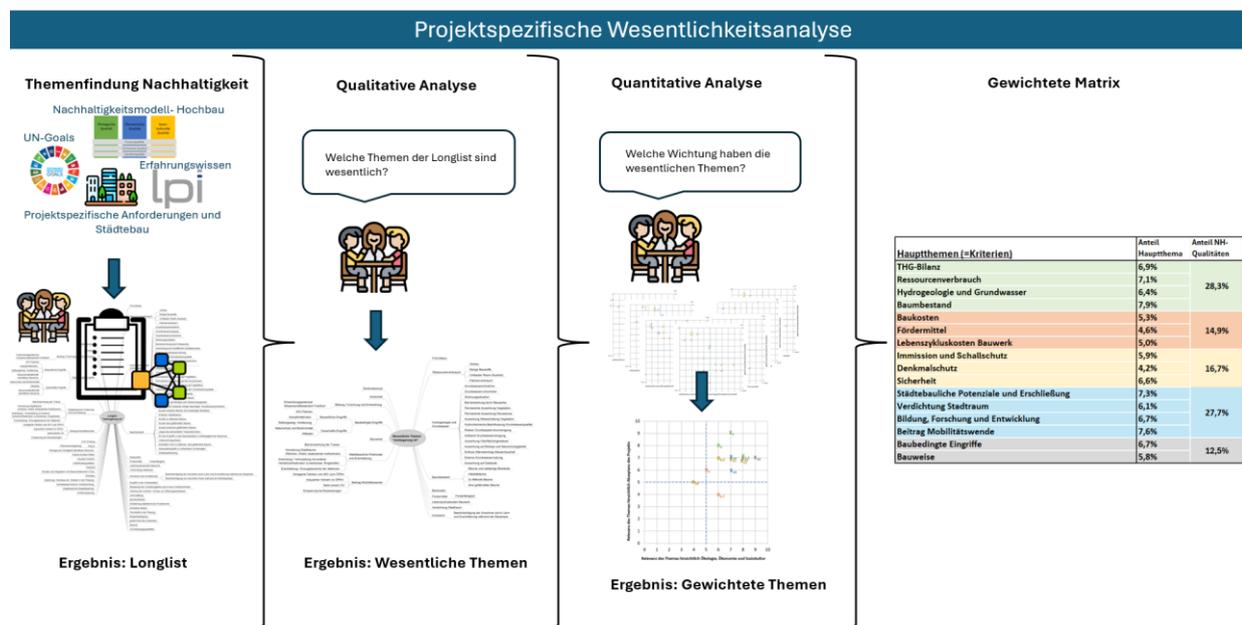


Abbildung 7: Schritte zur Herleitung der Nachhaltigkeitsbewertungsmatrix der Verlängerung U4

Die Herleitung der projektspezifischen Nachhaltigkeitsbewertungsmatrix erfolgt daher mittels einer projektspezifischen Wesentlichkeitsanalyse. Diese ist in drei übergeordnete Schritte untergliedert:

- „Themenfindung der projektspezifischen Nachhaltigkeitsthemen“,
- „Qualitative Analyse der Themen hinsichtlich der relevanten Nachhaltigkeitsthemen“ und
- „Quantitative Analyse der relevanten Themen“ hinsichtlich ihrer Wichtung untereinander

In einem ersten Schritt erfolgt zunächst eine umfassende Sammlung an Nachhaltigkeitsthemen, die sowohl die Belange des notwendigen Bedarfs als auch die Belange der Nutzenden und der Öffentlichkeit berücksichtigen. Die Themensammlung wird in Form einer sogenannten Longlist festgehalten.

Im Anschluss daran werden die Themen der Longlist einer qualitativen Analyse unterzogen, um jene Themen zu identifizieren, die für das Projekt „Verlängerung U4“ von hoher Bedeutung sind. Das Ergebnis sind die identifizierten wesentlichen Nachhaltigkeitsthemen, anhand derer die Nachhaltigkeit projektspezifisch beschrieben wird. Der dritte Schritt der quantitativen Analyse ordnet die Themen hinsichtlich ihrer Gewichtung am Gesamtergebnis der Nachhaltigkeit des Projektes ein. Für jedes Thema wird dabei analysiert, welche Bedeutung es für die projektspezifische Nachhaltigkeit hat. Die Bewertung erfolgt hierbei aus den bereits oben beschriebenen Perspektiven:

- Relevanz des Nachhaltigkeitsthemas für die Auswirkung des Projektes auf Ökologie, Ökonomie und Soziokultur (Inside-Out-Perspektive),
- Relevanz des Themas für die Akzeptanz bei Nutzenden und in der Öffentlichkeit

Abschließend werden die gewichteten Nachhaltigkeitsthemen (=Kriterien) in Form einer Nachhaltigkeitsmatrix zu einem Bewertungssystem zusammengeführt, anhand dessen eine Bewertung der Varianten erfolgen kann. Der vollständige Herleitungsprozess des projektspezifischen Nachhaltigkeitsbewertungssystems kann der Abbildung 7 entnommen werden. In den folgenden Kapiteln 4.2.1– 4.2.4 erfolgt eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Schritte der angewandten projektspezifischen Wesentlichkeitsanalyse.

4.2.2 Themenfindung Nachhaltigkeit

Zunächst sind im Rahmen der Themenfindung potenziell relevante Nachhaltigkeitsthemen zu identifizieren und zusammenzutragen. Dieser Schritt erfolgte SBEV-intern. Die relevanten Themen können dabei aus einem übergeordneten Hauptthema (=Kriterium) bestehen und diesem Thema zugeordnete Unterthemen (=Indikatoren). Ein Beispiel hierfür stellt das Thema „*Beitrag Mobilitätswende*“ dar. Diesem Thema können zur besseren Beschreibung Unterthemen, wie z. B. „*Verlagerte Fahrten vom MIV zum ÖPNV*“, „*Induzierter Verkehr ÖPNV*“, „*Mehrverkehr ÖPNV*“ und „*Einsparung bei Busleistungen*“ zu geordnet werden. Daher macht es Sinn, die Themen in mehreren Ebenen zu Clustern. Das Hauptthema „*Mobilitätswende*“ stellt damit das „Kriterium“ dar, das durch ein oder mehrere Unterthemen, sogenannte „Indikatoren“, beschrieben werden kann. Somit entsteht in der Themenliste eine hierarchische Struktur aus „Kriterien“ (=Hauptthemen) mit zugeordneten Indikatoren (=Unterthemen). Die Abbildung 8 beschreibt dieses Vorgehen nochmal bildlich. Zur besseren Veranschaulichung ist das Prinzip der Clusterrung anhand des ausgewählten Hauptthemas „*Beitrag Mobilitätswende*“ kurz dargestellt. Im weiteren Prozess werden für die qualitativen und quantitativen Analysen der besonders relevanten Themen und deren Gewichtung nur noch die Hauptthemen (=Kriterien) herangezogen.

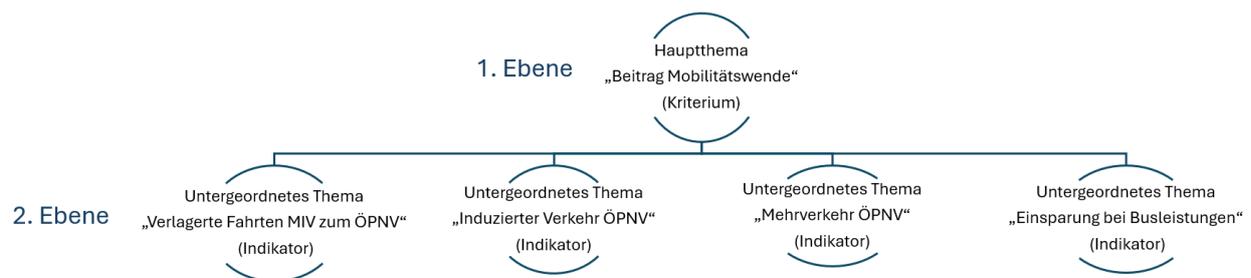


Abbildung 8: Ebenen der Clusterrung von Nachhaltigkeitsthemen

Als erste Anhaltspunkte für die Themenfindung fungiert beispielweise die bestehende technische Bewertungsmatrix der SBEV sowie freiwillige Standards und Rahmenwerke (z.B. UN SDGs). Diese Themenliste wird durch Themen ergänzt, die aus externer Sicht von Bedeutung sind. Hierzu wird auf die Anforderungen von städtischen Ämtern und Gesellschaften und auf Fachgutachten (z.B. Baumgutachten oder hydrogeologisches Gutachten) zurückgegriffen. Im Anschluss daran erfolgt ein Abgleich der SBEV-internen mit den externen Themen und die Überführung in eine Longlist (vgl. Abbildung 9) die entsprechend dem Zwei-Ebenen-Prinzip geclustert ist (vgl. Abbildung 8). Im Zuge der Themenfindung ist das Nachhaltigkeitsmodell aus dem Hochbau mit den drei klassischen Säulen und den Querschnittsthemen (vgl. Abbildung 5) stets mitzudenken, um eine möglichst umfassende und ausgewogene Sammlung an Nachhaltigkeitsthemen gewährleisten zu können.

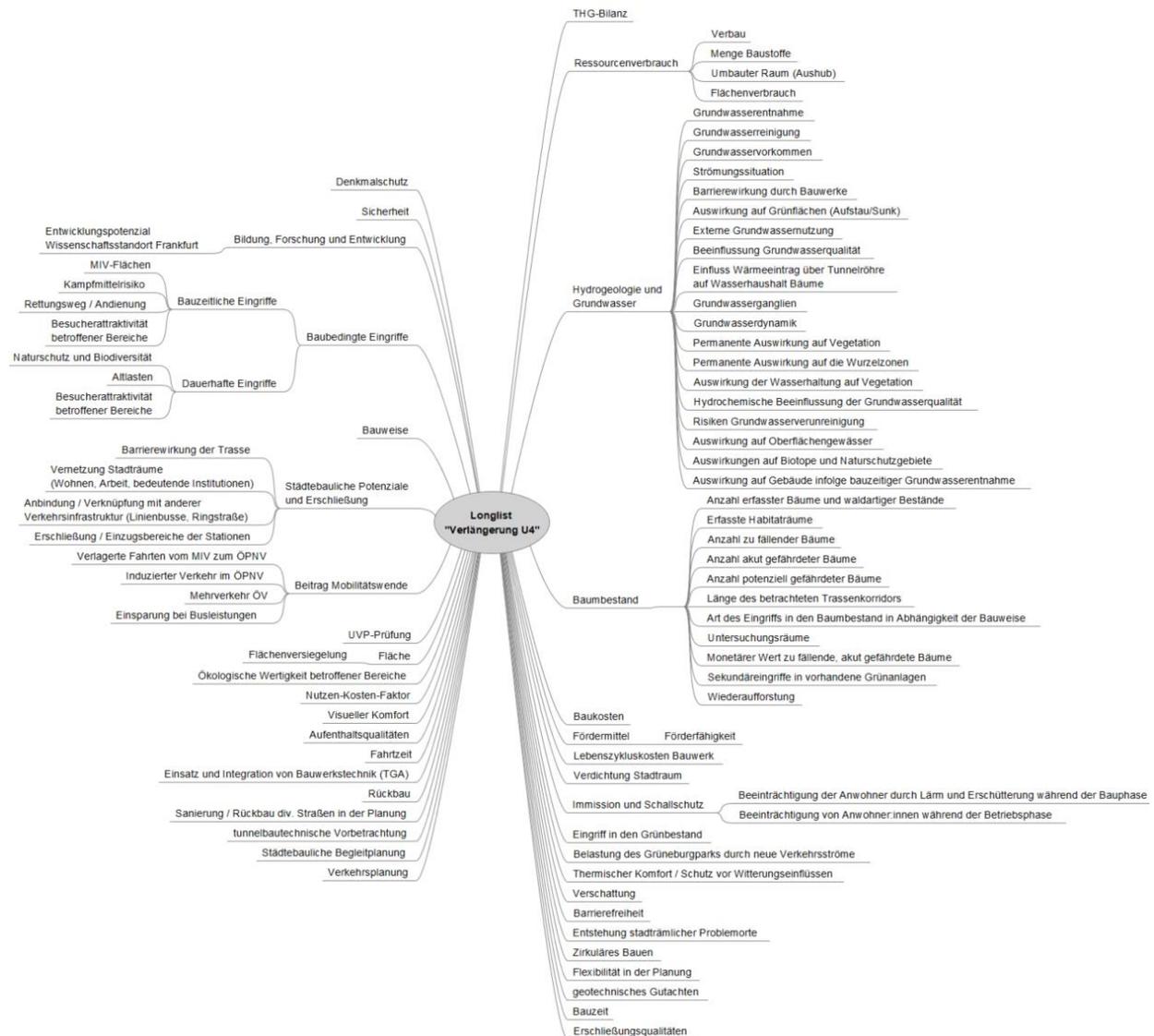


Abbildung 9: Umfassende Sammlung an Nachhaltigkeitsthemen – Die Longlist des Projektes „Verlängerung U4“

4.2.3 Qualitative Analyse

Mit der besten Absicht, möglichst alle identifizierten Nachhaltigkeitsthemen aus Kapitel 4.2.2 im Projekt zu berücksichtigen, darf nicht vergessen werden, dass je nach Projekt- bzw. Leistungsphase, unterschiedliche Themen relevant sind. So sind im Zuge eines grundsätzlichen Variantenentscheidungs andere Themen (z.B. Städtebau) von besonderer Bedeutung als beispielsweise in der Entwurfs- / Ausführungsplanung der Vorzugsvariante (z.B. Energieeffizienz der Haltestellen).

Hinzukommt, dass meist für die Themen der frühen Projektphasen auch die inhaltliche Tiefe der Projektbearbeitung fehlt, sodass eine Bewertung nicht erfolgen kann. Im Sinne einer effizienten Erarbeitung einer Vorzugslösung sind daher die Nachhaltigkeitsthemen zu priorisieren. Im Zuge der qualitativen Analyse werden die Themen der Longlist (vgl. Abbildung 9) daher unter dem Gesichtspunkt der Wesentlichkeit untersucht. Mit der Wesentlichkeitsanalyse können die Themen dahingehend identifiziert werden, ob sie für das Projekt von Bedeutung, d.h. wesentlich, oder eher von geringerer Bedeutung, d.h. nicht

wesentlich, sind. Hierzu wurden die Themen zum einen hinsichtlich ihrer Relevanz bzgl. Ökologie, Ökonomie und Soziokultur und zum anderen hinsichtlich ihrer Relevanz bzgl. der Akzeptanz von Nutzenden und in der Öffentlichkeit analysiert.

Die Identifikation der wesentlichen und nicht wesentlichen Themen erfolgte durch das städtische Kernteam. Das Ergebnis der qualitativen Analyse ist eine Sammlung der wesentlichen Nachhaltigkeitsthemen, vgl. Abbildung 10. Mit Hilfe der identifizierten wesentlichen Nachhaltigkeitsthemen kann nun einerseits eine effiziente Bewertung der Nachhaltigkeit der Varianten in den einzelnen Themen mit Hilfe der zugeordneten Unterthemen erfolgen. Andererseits können auch konkrete projektspezifische Nachhaltigkeitsziele formuliert werden. Um ein Gesamtergebnis für die Nachhaltigkeit zu erhalten, ist es nun noch wichtig, die Wichtung zwischen den Themen zu klären, vgl. Kapitel 4.2.4.

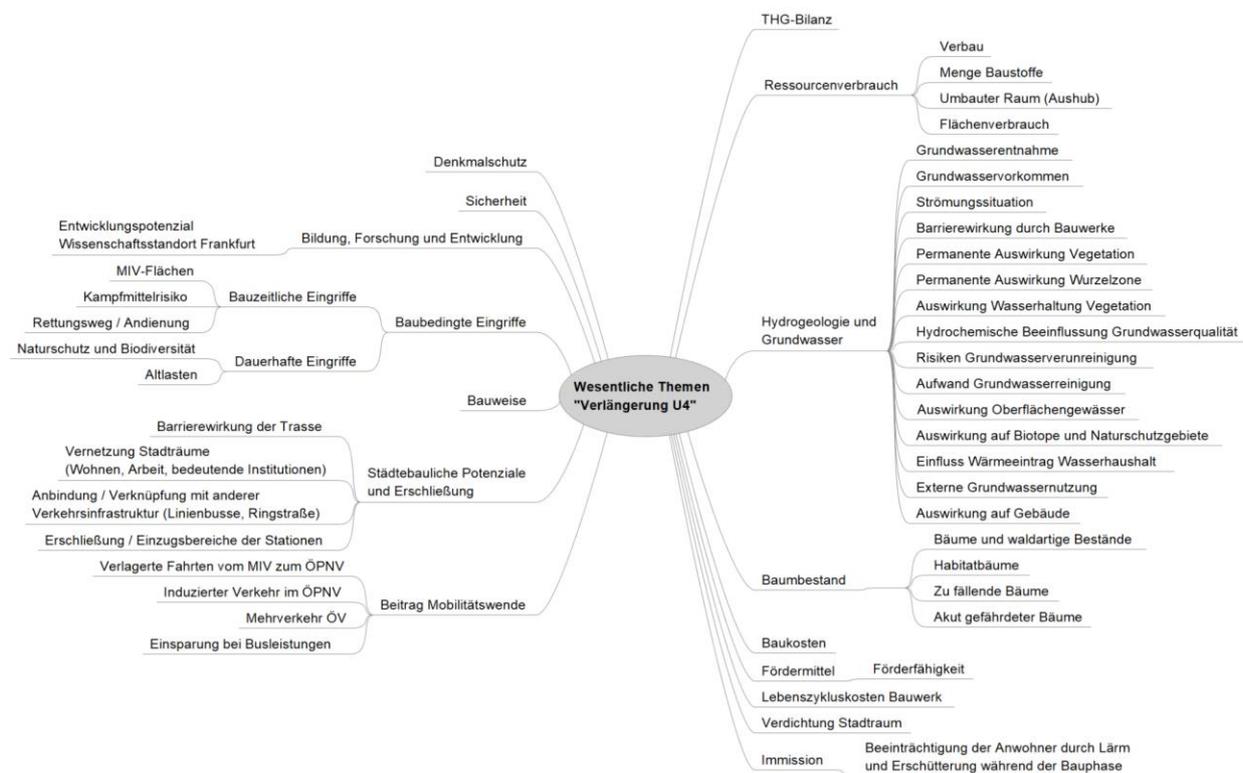


Abbildung 10: Identifizierte wesentlicher Themen im Zuge der Nachhaltigkeitsbewertung des Projektes „Verlängerung U4“

4.2.4 Quantitative Analyse

Für die quantitative Analyse der Nachhaltigkeit und die Ermittlung einer Gesamtnachhaltigkeit einer Variante muss geklärt werden, ob jedes Kriterium gleichwertig zu sehen ist oder ob Themen eine besondere Relevanz für die Nachhaltigkeit des Projektes besitzen. Hierzu werden die jeweiligen Hauptthemen (=Kriterien) - analog zur qualitativen Analyse - aus zwei verschiedenen Perspektiven bewertet. Zum einen wird bewertet, inwieweit das Thema relevant für die Auswirkungen des Projektes bzgl. Ökologie, Ökonomie und Soziokultur ist, zum anderen wird dessen Relevanz bzgl. der Akzeptanz des Projekts bei Nutzenden und in der Öffentlichkeit analysiert. Die quantitative Analyse erfolgt im städtischen Kernteam, das durch die wesentlichen Vertreter:Innen verschiedener Ämter und Gesellschaften (z.B. Städtebau, Umwelt, Verkehr etc.) die unterschiedlichen Sichtweisen auf das Projekt abbildet. Jede

Stakeholder-Partei führt zunächst eine eigene Analyse der Hauptthemen durch. Dabei werden die Themen in die sogenannte quantitative Wesentlichkeitsmatrix eingeordnet. Jedes Thema wird mit einer Bepunktung zwischen 1 (= sehr geringe Relevanz) und 10 (= sehr hohe Relevanz) eingeordnet, vgl. Abbildung 11. Die Bepunktung erfolgt in beide Richtungen, sodass ein Thema in dem dadurch entstehenden Koordinatensystem einordnet wird, vgl. Abbildung 11. Als Ergebnis entsteht für jeden Stakeholder eine Wesentlichkeitsmatrix mit dessen Einordnung der Themen.

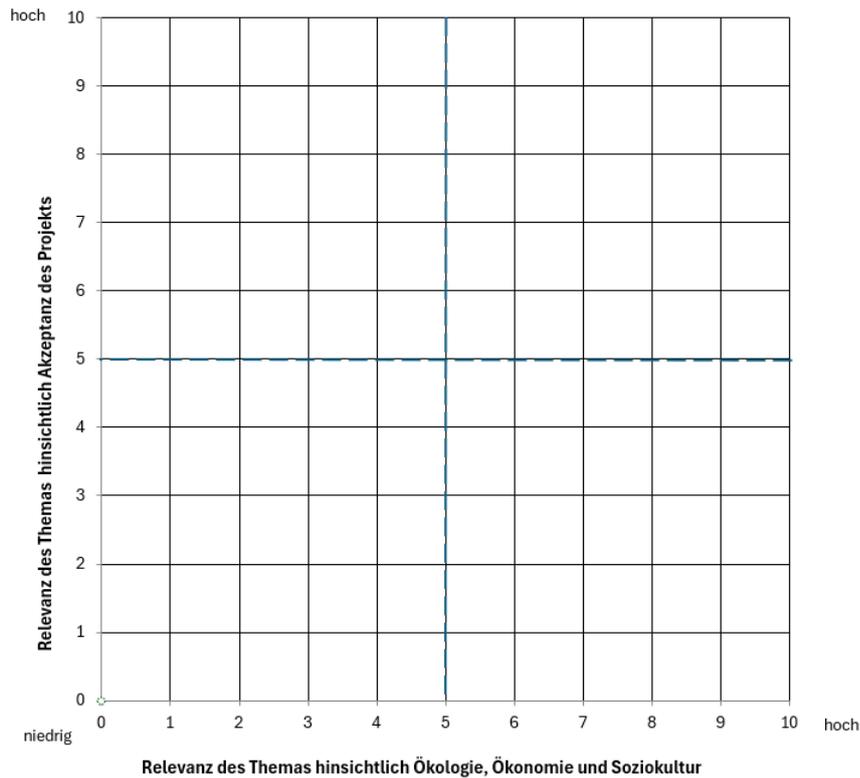
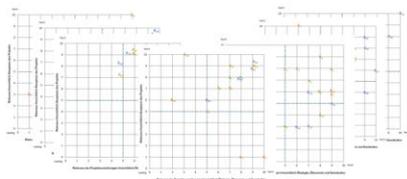


Abbildung 11: Vorlage Quantitative Wesentlichkeitsmatrix

Damit am Ende eine gemeinsame Wesentlichkeitsmatrix entsteht, werden die Einzelmatrixen miteinander fusioniert. Dies erfolgt auf Basis einer statistischen Auswertung, deren Vorgehen in Abbildung 12 beschrieben wird.



Statistische Auswertung der einzelnen Matrizen der Stakeholder

Hauptthemen (=Kriterien)	Mittelwerte	
	x-Achse	y-Achse
1 THG-Bilanz	7,6	7,3
2 Ressourcenverbrauch	8,0	7,3
3 Hydrogeologie und Grundwasser	6,1	7,7
4 Baumbestand	7,4	9,4
5 Baukosten	5,2	6,1
6 Fördermittel	5,7	4,1
7 Lebenszykluskosten Bauwerk	6,4	4,1
9 Immission und Schallschutz	5,7	6,9
10 Denkmalschutz	4,1	4,9
11 Sicherheit	7,1	7,1
15 Städtebauliche Potenziale und Erschließung	8,3	7,4
8 Verdichtung Stadtraum	6,4	6,7
12 Bildung, Forschung und Entwicklung	7,9	6,6
16 Beitrag Mobilitätswende	9,1	7,1
13 Baubedingte Eingriffe	7,1	7,4
14 Bauweise	6,6	5,9

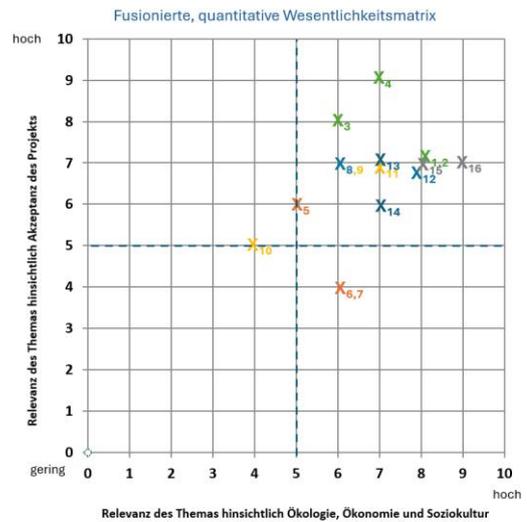


Abbildung 12: Prozessschema - Von den Stakeholder-Matrizen zur fusionierten, quantitativen Wesentlichkeitsmatrix

Für jedes Thema erfolgt dabei eine Mittelwertbildung sowohl in der Relevanz hinsichtlich Ökologie, Ökonomie und Soziokultur, als auch in der Relevanz für die Akzeptanz bei Nutzenden und in der Öffentlichkeit.

Entsprechend kann auf Basis dieser Auswertung eine fusionierte Wesentlichkeitsmatrix auf Grundlage der gemittelten Koordinaten erstellt werden. Der Abstimmungsprozess zur Wesentlichkeit sieht darüber hinaus ein Abstimmungsgespräch mit aktiver Diskussion der Themen vor, die im Rahmen eines Ortstermins stattfand. So konnten besonders kontrovers bewertete Themen nochmal gemeinsam diskutiert und die unterschiedlichen Standpunkte dazu ausgetauscht werden. Im Anschluss bestand für die Beteiligten die Möglichkeit, die Einordnung der Themen nochmals final anzupassen.

Die final abgestimmte und fusionierte Wesentlichkeitsmatrix bildet die Basis für die Ermittlung der prozentualen Anteile (= Wichtung) der einzelnen Kriterien für die projektspezifische Nachhaltigkeitsbewertung im Rahmen der Variantenentscheidung. Die Ermittlung der prozentualen Anteile eines Kriteriums an der Nachhaltigkeit erfolgt durch den Quotienten aus dem Gradienten und der Summe aller Gradienten, vgl. Berechnungsgrundlage in Anhang A.1. Die dabei final ermittelten prozentuellen Anteile der jeweiligen Kriterien werden in Abbildung 13 zusammengestellt. Die prozentuellen Anteile werden im nächsten Schritt gleichmäßig auf die jeweiligen, das Hauptthema beschreibenden Indikatoren verteilt, vgl. Anhang A.4. Durch diese Zusammenstellung der Hauptthemen sowie deren Gewichtung entsteht damit ein Gesamtüberblick über die relevanten Nachhaltigkeitskriterien, die für die Bewertung der Varianten herangezogen werden.

	Hauptthemen (=Kriterien)	Gradient (x;y)	Anteil Hauptthema	Anteil NH-Qualitäten
Ökologie	THG-Bilanz	10,5	6,9%	28,3%
	Ressourcenverbrauch	10,8	7,1%	
	Hydrogeologie und Grundwasser	9,8	6,4%	
	Baumbestand	12,0	7,9%	
Ökonomie	Baukosten	8,1	5,3%	14,9%
	Fördermittel	7,1	4,6%	
	Lebenszykluskosten Bauwerk	7,6	5,0%	
Soziokultur	Immission und Schallschutz	8,9	5,9%	16,7%
	Denkmalschutz	6,4	4,2%	
	Sicherheit	10,1	6,6%	
Städtebau und Standort	Städtebauliche Potenziale und Erschließung	11,1	7,3%	27,7%
	Verdichtung Stadtraum	9,2	6,1%	
	Bildung, Forschung und Entwicklung	10,2	6,7%	
	Beitrag Mobilitätswende	11,6	7,6%	
Prozesse	Baubedingte Eingriffe	10,2	6,7%	12,5%
	Bauweise	8,8	5,8%	
Summe		153	100%	100%

Abbildung 13: Gewichtung der Kriterien (=Hauptthemen) mittels Gradientenbildung

Im weiteren Verlauf einer Bewertung einer Varianten ist es mit diesen Anteilen möglich, eine Gesamtnachhaltigkeit mit Hilfe des sogenannten Gesamterfüllungsgrades zu ermitteln. Dabei sind die quantitativen Einzelergebnisse der Bewertung einer Variante in einem Kriterium jeweils mit der prozentuellen Gewichtung des Kriteriums am Gesamtergebnis zu multiplizieren. Werden alle gewichteten Einzelergebnisse aufsummiert und durch die Gesamtpunktzahl geteilt, ergibt dies eine Zahl, die beschreibt, wie nah die jeweilige betrachtete Ausführungsvariante an einer ideellen Variante liegt und welche Variante in allen Nachhaltigkeitskriterien bestmöglich abschneidet. Die damit ermittelte Kennzahl wird „Gesamterfüllungsgrad der Nachhaltigkeit“ genannt. Eine genaue Berechnung des Gesamterfüllungsgrades wird in Anhang A.5 beschrieben.

4.3 Anwendung des Bewertungssystems

Nach Herleitung der gewichteten Bewertungsmatrix, vgl. Abbildung 13, kann nun eine konkrete Bewertung der verschiedenen Varianten vorgenommen werden. Hierzu ist es zunächst erforderlich, die einzelnen Kriterien bzw. Indikatoren einer fachlichen Bewertung durch entsprechende Fachinstanzen zu unterziehen. Daran anschließend erfolgt sowohl eine qualitative Bewertung mittels eines sogenannten Ampelsystems als auch eine quantitative Bewertung in Form eines 0-1-2 Systems. Ziel dieser beiden Bewertungsvarianten ist es, jeweils ein Ranking zwischen den drei Varianten herzustellen, welches einerseits visuell schnell aufnehmbar und andererseits quantifizierbar für den weiteren Auswertungsprozess der Nachhaltigkeit ist. An dieser Stelle sei nochmal herausgestellt, dass es sich bei dieser Bewertungsform um eine vergleichende Bewertung handelt. Gleichwohl kann so für eine Vorzugsvariante auch herausgestellt werden, in welchen Bereichen noch Defizite gegenüber anderen Lösungen vorherrschen. Unter Berücksichtigung der Wichtung der Kriterien erfolgt die Gesamtbewertung der einzelnen Varianten, die in Form einer sogenannten Nachhaltigkeitsblume je Variante dargestellt wird. Einen Gesamtüberblick über den Bewertungsprozess gibt Abbildung 14.

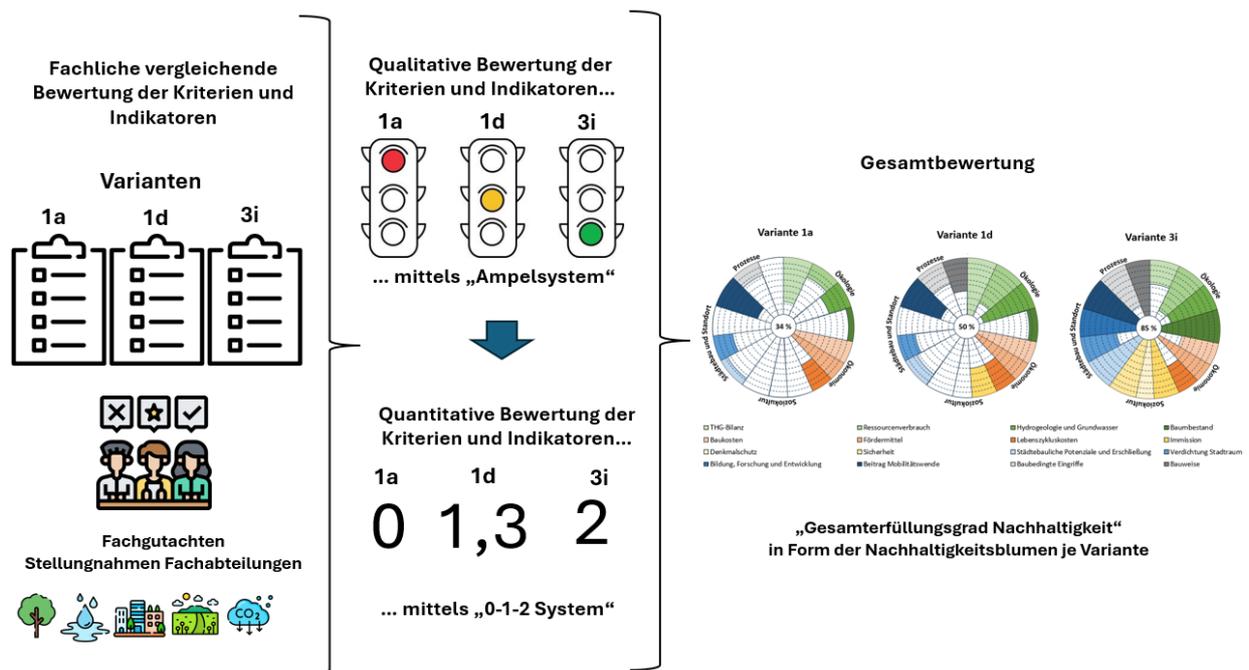


Abbildung 14: Prozessschema - Herleitung Bewertungssystematik Verlängerung U4

4.3.1 Fachliche Bewertung

Der erste Schritt der Bewertung der Kriterien erfolgt prinzipiell auf Ebene der Indikatoren. Sofern ein Kriterium lediglich eine Bewertungsgröße hat, stellt der Indikator gleichzeitig das Kriterium dar und beschreibt damit dessen Bewertung direkt (z.B. THG-Bilanz). In Abbildung 15 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die Kriterien und Indikatoren der Bewertungsmatrix inkl. der Zuordnung zu den drei klassischen Nachhaltigkeitssäulen sowie Querschnittsthemen im Überblick dargestellt.

Nachhaltigkeitsqualitäten und Querschnittsthemen	Hauptthema (Kriterium)	untergeordnetes Thema (Indikator)
Ökologie	THG-Bilanz	-
	Ressourcenverbrauch	Verbau
		Menge Baustoffe
		Umbauter Raum (Aushub)
		Flächenverbrauch
	Hydrogeologie und Grundwasser	Grundwasserentnahme
		Grundwasservorkommen
		Strömungssituation
		Barrierewirkung durch Bauwerke
		Permanente Auswirkung Vegetation
		Permanente Auswirkung Wurzelzone
		Wasserhaltung Vegetation
		Hydrochemische Beeinflussung
		Risiken Grundwasserreinigung
		Grundwasserreinigung
Oberflächengewässer		
Auswirkung Biotope und Naturschutzgebiete		
Einfluss Wärmeeintrag Wasserhaushalt		
Externe Grundwassernutzung		
Auswirkung auf Gebäude		
Baumbestand	Bäume und waldartige Bestand	
	Habitatbäume	
	Zu fällende Bäume	
	Akut gefährdete Bäume	
Ökonomie	Baukosten	-
	Fördermittel	Förderfähigkeit
	Lebenszykluskosten Bauwerk	-
Soziokultur	Immissionen	Lärm und Erschütterung
	Denkmal-schutz	-
	Sicherheit	-
Städtebau und Standort	Städtebauliche Potenziale und Erschließung	Barrierewirkung der Trasse
		Vernetzung Stadträume
		Anbindung / Verknüpfung mit anderer Verkehrsinfrastruktur (Linienbusse, Ringstraße)
		Erschließung / Einzugsbereiche der Stationen
	Verdichtung Stadtraum	-
Bildung, Forschung und Entwicklung	Entwicklungs-potenzial Wissenschafts-standort	
Beitrag Mobilitäts-wende	Verlagerte Fahrten vom MIV zum ÖPNV	
	Induzierter Verkehr ÖPNV	
	Mehrverkehr ÖPNV	
	Einsparung bei Busleistungen	
Prozesse	Baubedingte Eingriffe (bauzeitlich)	MIV-Flächen
		Kampfmittelrisiko
	Baubedingte Eingriffe (dauerhaft)	Rettungsweg / Andienung
		Naturschutz und Biodiversität
Bauweise	Altlasten	
		-

Abbildung 15: Übersicht Kriterien und Indikatoren der Bewertungsmatrix inkl. Zuordnung zu den Nachhaltigkeitsqualitäten und Querschnittsthemen

Die Kriterien bzw. Indikatoren werden zunächst einer fachlichen Bewertung unterzogen. Diese wird durch entsprechende Fachgutachter:innen und Expert:innen vorgenommen. Als Grundlage fungieren überwiegend projektspezifische Gutachten sowie Stellungnahmen von Fachinstanzen. Eine Aggregation der fachlichen Bewertungen in textlicher Form können dem Anhang A.3 entnommen werden.

4.3.2 Qualitative Bewertung

Aufgrund der allgemein bekannten Herausforderung, Nachhaltigkeitskriterien und deren Indikatoren einer direkten Quantifizierung zu unterziehen, erfolgt zunächst eine qualitative Bewertung. Im Zuge der qualitativen Bewertung wird ein sogenanntes Ampel-System angewandt, d.h. jene Variante, die innerhalb eines Kriteriums bzw. Indikators im Vergleich zu den anderen Varianten am besten abschneidet, bekommt die Farbe Grün. Im Gegensatz dazu wird jene Variante, die im Vergleich zu den anderen betrachteten Varianten am schlechtesten abschneidet, mit der Farbe Rot versehen. Der Variante dazwischen wird die Farbe Gelb zugeordnet. Aufgrund der Tatsache, dass die Bewertung bei manchen Varianten innerhalb eines Kriteriums bzw. Indikators identisch ist (z.B. bei Variante 1a und 1d ist der Indikator „Anzahl der verlagerten Fahrten vom MIV zu ÖPNV“ jeweils mit 11.500 angesetzt) kann es vorkommen, dass in ausgewählten Fällen eine Gleichbewertung der Varianten z.B. mit der Farbe Gelb erfolgt. Die Ergebnisse der qualitativen Bewertung können ebenfalls in tabellarischer Form dem Anhang A.3 entnommen werden.

4.3.3 Quantitative Bewertung

Im Zuge der quantitativen Bewertung erfolgt die Überführung des Ampel-Systems (qualitative Bewertung) in ein sogenanntes 0-1-2 System. Die Durchführung der quantitativen Bewertung erlaubt eine Aggregation über alle Kriterien und Indikatoren hinweg, wodurch ein Vergleich der Nachhaltigkeitsperformance der betrachteten Varianten ermöglicht wird. Aufgrund der Unterschiedlichkeit der einzelnen Kriterien und Indikatoren sind hierzu 4 verschiedene Methoden (A, B, C und D) zur Anwendung gekommen, die im weiteren Verlauf des Kapitels genauer beschrieben werden. Eine Übersicht, welche Kriterien und Indikatoren mittels der hier beschriebenen 4 Methoden quantifiziert wurden, ist dem Anhang A.2 zu entnehmen.

Methode A

Die Methode A kommt zum Einsatz, sofern keine unmittelbare Quantifizierung des Kriteriums bzw. Indikators anhand messbarer Eigenschaften, wie z.B. Baukosten oder dergleichen, möglich ist. Konkret bedeutet dies, dass das Ampelsystem (rot-gelb-grün) direkt in ein 0-1-2 System überführt wird. Idealerweise kann die beste Variante innerhalb eines Kriteriums oder Indikators mit 2 Punkten, die schlechteste Variante mit 0 Punkten und die Variante dazwischen mit 1 Punkt versehen werden. Der direkte Vergleich innerhalb eines Kriteriums oder Indikators nach dem 0-1-2 Prinzip ist jedoch nicht immer möglich, da manche Varianten innerhalb eines Kriteriums exakt gleich bewertet sind, vgl. Kapitel 4.3.1. Dies resultiert dann beispielsweise in einer 0-0-1- oder 1-2-1-Bewertung. Die Methode A ist mit circa 63 % die am häufigsten angewandte Methodik.

Methode B

Im Gegensatz zu den Kriterien, die mit Hilfe der Methode A quantifizierbar gemacht werden, sind manche Kriterien anhand konkreter Kennzahlen direkt quantifiziert. In diesen Fällen erfolgt eine Bewertung nach Methode B. Hierunter fällt beispielsweise das Kriterium „Baukosten“. Das Prinzip der Bewertung folgt einem Ansatz, der sich in der Baubranche bei Ausschreibungen und Vergabefahren etabliert hat. Demnach bekommt der niedrigste Angebotspreis (=bester Wert) die maximale Punktzahl von 2, der doppelt so hohe Angebotspreis (=schlechtester Wert) bekommt hingegen 0 Punkte. Angebotspreise, die

zwischen dem niedrigsten und dem doppelten Preis liegen, werden einer Interpolation unterzogen und erhalten entsprechend eine Bepunktung zwischen 0 und 2. Dieses Bewertungsprinzip wird, wenn auch in umgekehrter Form, auch bei jenen Kriterien oder Indikatoren angewandt, bei denen der höchste Wert als beste Option (=2 Punkte) und demnach der halb so hohe Wert als schlechteste Option (=0 Punkte) innerhalb einer Variante identifiziert wird. Als Beispiel seien hier die Indikatoren „Verlagerte Fahrten MIV zum ÖPNV“ und „Induzierter Verkehr ÖPNV“ zu nennen. Die Methode B ist mit circa 17 % die am zweithäufigsten angewandte Methodik.

Methode C

Kriterien und Indikatoren, die mittels der Methode C quantifiziert werden, folgen prinzipiell dem Bewertungsansatz der Methode B, wonach der beste Wert mit 2 und der schlechteste Wert mit 0 Punkten versehen wird. Werte dazwischen werden entsprechend interpoliert. Der Unterschied zu Methode B liegt darin, dass Methode C dann zum Einsatz kommt, wenn die Werte für die Kriterien und Indikatoren sehr weit auseinanderliegen; wie z. B. bei den Indikatoren „Anzahl zu fällende Bäume“ oder „Einsatz von Verbau“. In diesen Fällen kann nicht nach der Methode B „niedrigster Wert bekommt maximale Punktzahl, doppelt so hoher Wert bekommt keine Punkte“ vorgegangen werden. Etwa 15 % der Kriterien und Indikatoren werden nach dem Prinzip der Methode C quantifiziert.

Methode D

Die Methode D kommt zum Einsatz, wenn es innerhalb eines Kriteriums einen absolut besten bzw. schlechtesten Fall gibt. Als Beispiel sei hier das Kriterium „Bauweise“ zu nennen. So ist der Bau eines Tunnels in komplett geschlossener Bauweise als absolut bester einzutretender Fall anzusehen und damit mit zwei Punkten, der Bau eines Tunnels in komplett offener Bauweise hingegen als schlechtester Fall anzusehen und daher mit null Punkten zu bewerten. Anteile dazwischen werden entsprechend interpoliert. Lediglich 4% der Kriterien und Indikatoren werden nach dem Prinzip der Methode D bewertet.

Die Ergebnisse der quantitativen Bewertung können in tabellarischer Form dem Anhang A.4 entnommen werden. Darüber hinaus findet eine visuelle zusammenfassende Darstellung in Kapitel 5 statt.

5 Nachhaltigkeitsziele und Ergebnis der Nachhaltigkeitsbewertung

In diesem Kapitel erfolgt die abschließende Ergebnisdarstellung der Varianten. Das Ergebnis der bisherigen und vorab beschriebenen Arbeit im Bereich der Nachhaltigkeit kann in zwei Bereiche unterteilt werden:

- Beschreibung der qualitativen und quantitativen Herleitung von projektspezifischen Nachhaltigkeitsthemen auf deren Basis projektspezifische Nachhaltigkeitsziele abgeleitet werden können.
- Bewertung der drei Varianten im entwickelten projektspezifischen Nachhaltigkeitsbewertungssystem zur Ermittlung einer Vorzugsvariante im Sinne der Nachhaltigkeit. Dies erfolgt sowohl qualitativ (vgl. Anhang A.3) als auch quantitativ mit Ausweisung eines Gesamterfüllungsgrades für die verschiedenen Varianten.

Nachfolgend werden beide Teile vorgestellt.

5.1 Nachhaltigkeitsziele

Ziele sind entscheidend für den Erfolg und die Effektivität von Projekten, da sie eine klare Richtung aufzeigen und somit Orientierung geben. Zudem bilden Sie die Grundlage für einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess und sind daher der Schlüssel für eine erfolgreiche Umsetzung von Plänen und Vorhaben in die Projektpraxis. Auch im Zuge des Trassierungsentscheids der Verlängerung der U4 sind Ziele unerlässlich, um die Projektnachhaltigkeit effizient voranzubringen. Die Herleitung der Nachhaltigkeitsziele erfolgte auf Basis der durchgeführten Wesentlichkeitsanalyse (qualitative Analyse). Die im Rahmen der qualitativen Wesentlichkeitsanalyse hergeleiteten Themen sind in Tabelle 1 im Überblick dargestellt. In Ergänzung dazu können damit 16 Nachhaltigkeitsziele für den Trassierungsentscheid formuliert werden. Die 16 Nachhaltigkeitsziele beschreiben je Thema (=Kriterium), welches Optimierungsziel im jeweiligen Kriterium im Rahmen des Variantenentscheids und ggf. darüber hinaus im weiteren Projektverlauf verfolgt wird. Die weitere Verfolgung der Themen (=Kriterien) auch über den Variantenentscheid hinaus ist Aufgabe des weiteren Projektmanagements und mündet u.a. in konkreten Maßnahmen, die in Planung und Ausführung umgesetzt werden. Die damit verbundene Nachhaltigkeitsstrategie für das Projekt wird derzeit gesondert durch LPI und die SBEV erarbeitet und ist nicht Thema dieses Berichtes. Dennoch orientieren sich die im Folgenden dargestellten Kriterienbewertungen an diesen übergeordneten Nachhaltigkeitszielen.

Hauptthemen (= Kriterien)	Zielformulierung
THG-Bilanz	Reduktion der Treibhausgasemissionen
Ressourcenverbrauch	Verringerung des Ressourcenverbrauchs
Hydrogeologie und Grundwasser	Möglichst geringe Eingriffe in Wasserressourcen
Baumbestand	Möglichst geringe Eingriffe in den Baumbestand
Baukosten	Optimierung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses
Fördermittel	Gewährleistung der Förderfähigkeit des Bauvorhabens
Lebenszykluskosten	Berücksichtigung der Lebenszykluskosten bereits bei der Trassierungsfindung
Immission und Schallschutz	Begrenzung von Immissionen im Baubetrieb auf ein mögliches Minimum
Denkmalschutz	Begrenzung der Eingriffe in denkmalgeschützte Bereiche und Gebäude auf ein mögliches Minimum
Sicherheit	Gewährleistung der Sicherheit von Anwohner:innen und Verkehrsteilnehmer:innen während der Planungs- und Bauphase.
Städtebauliche Potenziale und Erschließung	Steigerung des städtebaulichen Potenzials und Beitrag zur weiteren Erschließung des Stadtgebiets
Verdichtung Stadtraum	Beitrag zur Vermeidung einer weiteren Verdichtung des Stadtraumes
Bildung, Forschung und Entwicklung	Förderung des Entwicklungspotenzials des Wissenschaftsstandorts Frankfurt
Mobilitätswende	Beitrag zur Mobilitätswende
Baubedingte Eingriffe	Reduktion der baubedingten Eingriffe auf ein mögliches Minimum
Bauweise	Anwendung einer möglichst anwohnerfreundlichen Bauweise

Tabelle 1:Nachhaltigkeitsziele Variantenentscheid „Verlängerung U4“

5.2 Nachhaltigkeitsbewertungsmatrix „Trassierung“ - der Gesamterfüllungsgrad

Die drei Varianten wurden auf Basis des in Kapitel 4.2 hergeleiteten und beschriebenen, projektspezifischen Bewertungssystems bewertet. Mit Hilfe einer quantifizierten Bewertung ist es möglich, eine Gesamtbewertung der Nachhaltigkeit übergeordnet zu den bewerteten Einzelkriterien (Anhang A.4) darzustellen. Für jede Variante wurde dafür der zuvor beschriebene Gesamterfüllungsgrad im Sinne der Nachhaltigkeit ermittelt. Die dahinterstehende Methodik ist in Anhang A.5. beschrieben. Die so ermittelte Kennzahl des Gesamterfüllungsgrades berücksichtigt damit ökologische, ökonomische, soziokulturelle, prozesstechnische sowie städtebau- und standortbezogene Aspekte und vereint diese zu einem Wert. Um die Ergebnisse gesamtheitlich und übersichtlich darzustellen, kann die sogenannte Nachhaltigkeitsblume, die bereits im Hochbau etabliert ist, verwendet werden, vgl. Abbildung 16.



Abbildung 16: Nachhaltigkeitsblume inkl. der Nachhaltigkeitskriterien des Projektes „Verlängerung U4“ nach dem Prinzip der DGNB

Die jeweiligen Kriterien sind dabei ein Teilsegment der Nachhaltigkeitsblume. Die Segmentbreite beschreibt dabei die Wichtung des jeweiligen Kriteriums an dem Gesamterfüllungsgrad, der in der Mitte der Blume ausgewiesen wird. Die Erfüllung eines Kriteriums durch eine Variante wird jeweils durch die farbliche Ausfüllung des jeweiligen Segmentes dargestellt. Je besser einer Variante in einem Kriterium abschneidet, desto mehr ist das Segment farblich gefüllt. Der Erfüllungsgrad eines Kriteriums wird zusätzlich durch die gestrichelten Kreisringe dargestellt. Da es sich bei der vorgenommenen Bewertung um eine vergleichende Bewertung handelt, bedeuten weiße Teilsegmente, dass die betrachtete Variante im Vergleich zu den übrigen Varianten schlechter bzw. am schlechtesten abgeschnitten hat. Einen Bezug auf eine absolute Bewertung anhand fester Kennzahl, die es z. B. aus dem Hochbau gibt, kann

hier nicht abgeleitet werden, da diese Grenzwerte für den Ingenieur- und Infrastrukturbau in der Regel nicht existieren. Das Gesamtergebnis für die drei untersuchten Trassierungsvarianten im Projekt „U4 Verlängerung“ ist visuell nachvollziehbar in Form der „Nachhaltigkeitsblume“ in Abbildung 17 dargestellt.



Abbildung 17: Gesamterfüllungsgrad Nachhaltigkeit je Trassierungsvariante

Mit Hilfe Abbildung 17 der wird zunächst deutlich, dass keine der untersuchten Varianten in allen Nachhaltigkeitskriterien bestmöglich abschneidet. Insbesondere Variante 1a zeigt anhand der weißen Kriterienssegmente, dass diese Variante gegenüber den anderen Varianten schlechter abschneidet. Demgegenüber erreicht die Variante 3i mit 84 % den größten Gesamterfüllungsgrad im Vergleich zu den anderen beiden Varianten. Das heißt: Unter Berücksichtigung der getroffenen projektspezifischen Auswahl an Nachhaltigkeitskriterien und deren Wertung besitzt die Variante 3i im Vergleich zu den anderen Varianten die größte Erfüllung aller Kriterien. Sie stellt somit insgesamt die nachhaltigste Variante in dieser Betrachtungsform dar.

Dennoch können bei der Variante 3i Nachhaltigkeitsthemen identifiziert werden, in denen die Variante schlechter abschneidet. Sollte es zu einer Auswahl der Variante 3i kommen, wird empfohlen, ein besonderes Augenmerk auf die Verbesserung der Variante in den defizitären Bereichen zu legen, um eine weitere Nachhaltigkeitsoptimierung zu erreichen. Da es sich bei der vorgenommenen Bewertung um einen relativen Vergleich handelt, sollte ebenfalls weiter überprüft werden, ob auch in weiteren

Bereichen Steigerungen erreicht werden können, auch wenn die Variante bis dato bereits besser ggü. den Alternativen abschneiden konnte.

Betrachtet man die Abbildung 17, dann wird deutlich, dass insbesondere Variante 3i Vorteile gegenüber den 1er-Varianten hat, die sich insbesondere aus den städtebaulichen Aspekten und der Soziokultur ergeben. Diese beschreiben wesentliche Merkmale, die den Bedarf hinsichtlich der hier betrachteten Infrastruktur abbilden. Darüber hinaus können durch diese Variante wesentliche Baumbestände im Bereich der Ökologie erhalten bleiben, was insbesondere der geschlossenen Bauweise und der variierenden Streckenführung zuzuschreiben ist. Defizite gegenüber den anderen Varianten weist die Variante 3i insbesondere im Bereich der THG-Bilanz aus. Grund dafür ist, dass die Strecke ca. 1/3 länger ausfällt und damit mehr Material zu verbauen ist. Dies wirkt sich auch entsprechend auf die Kosten des Projektes aus. Eine materialeffiziente Ausführung sowohl hinsichtlich Kosten als auch THG-Bilanz sollte damit ein zentrales Ziel sein, um im weiteren Projektverlauf eine Steigerung der Nachhaltigkeit aus ökonomischer und ökologischer Sicht verfolgen zu können.

gez. die Autoren:

Dipl.-Ing. Christoph Begemann

Projektleiter und Leitung nachhaltiges Planen und Bauen

Dipl.-Ing. Daniela Eckert

Projekt Ingenieurin nachhaltiges Planen und Bauen

A Anhang

Anlagenübersicht:

- A.1: Herleitung der Kriteriengewichtung
- A.2: Überblick Kriterien, Indikatoren, Erläuterung und Quantifizierungsmethodik
- A.3: Qualitative Bewertung der Nachhaltigkeitsmatrix
- A.4: Quantitative Bewertung der Nachhaltigkeitsmatrix
- A.5: Gesamtergebnisse der Nachhaltigkeitsmatrix
- A.6: Literatur

A.1 Herleitung der Kriteriengewichtung

Im Rahmen der Herleitung einer quantitativen Bewertung der Nachhaltigkeit ist es erforderlich eine Gewichtung der Nachhaltigkeitsthemen vorzunehmen. Dafür wurde eine Wesentlichkeitsanalyse vorgenommen, die in Kapitel 4.2 dargestellt ist. Im Rahmen der Analyse erfolgt eine Bewertung der Themen hinsichtlich Ihrer Relevanz für Ökologie, Ökonomie und Soziokultur und der Relevanz für die Akzeptanz des Projektes bei Nutzenden und in der Öffentlichkeit. Die finale Matrix der Themeneinordnung ist in Abbildung 18 dargestellt. Eine Legende der Themen ist der Abbildung 19 zu entnehmen.

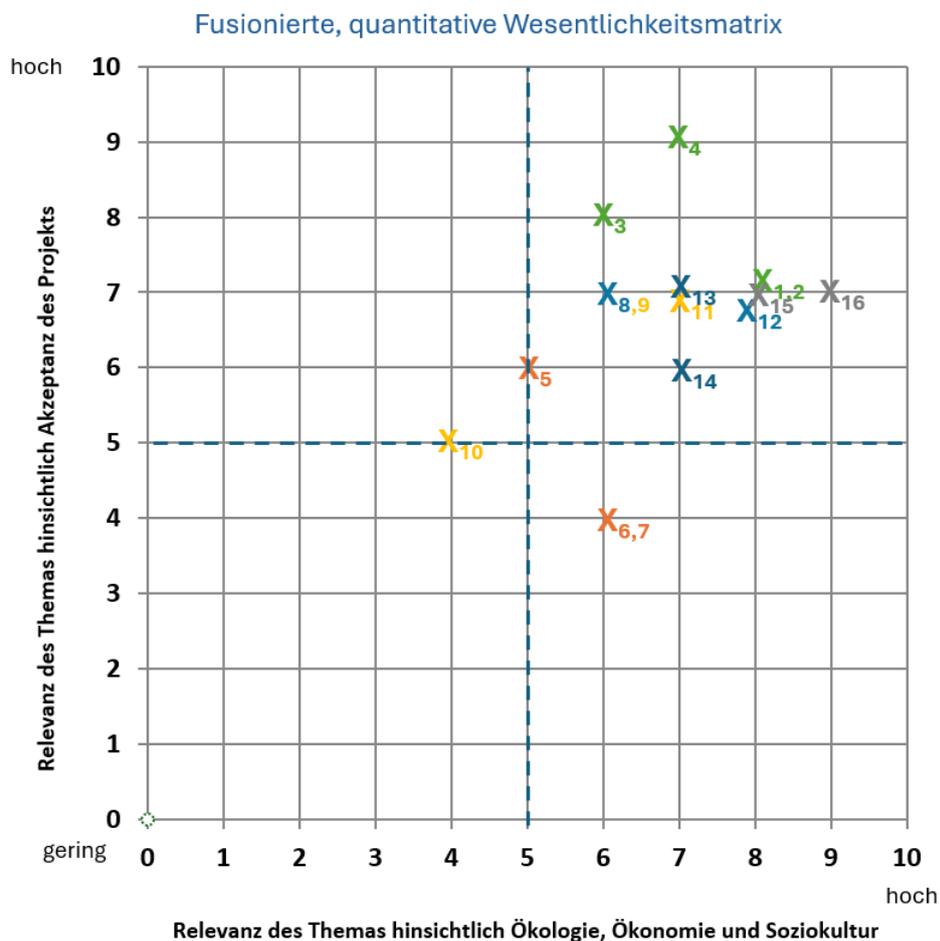


Abbildung 18: fusionierte Wesentlichkeitsanalyse der relevanten Nachhaltigkeitsthemen, gem. Kap. 4.2.4

Hauptthemen (= Kriterien)	
X ₁	THG-Bilanz
X ₂	Ressourcenverbrauch
X ₃	Hydrogeologie und Grundwasser
X ₄	Baumbestand
X ₅	Baukosten
X ₆	Fördermittel
X ₇	Lebenszykluskosten
X ₉	Immission und Schallschutz
X ₁₀	Denkmalschutz
X ₁₁	Sicherheit
X ₁₅	Städtebauliche Potenziale und Erschließung
X ₈	Verdichtung Stadtraum
X ₁₂	Bildung, Forschung und Entwicklung
X ₁₆	Mobilitätswende
X ₁₃	Baubedingte Eingriffe
X ₁₄	Bauweise

Abbildung 19: Legende Themen Wesentlichkeitsmatrix

Auf Basis der Ergebnisse können jedem Thema x- und y-Koordinaten zugeordnet werden. Im Anschluss erfolgt nun die Ermittlung eines Gradienten aus diesen beiden Angaben, nach nachfolgender Gleichung:

$$NH - Grad_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$$

Mit:

- $NH - Grad_i$ = Gradient für das Nachhaltigkeitsthema i
- x_i = Relevanz des Themas für die Auswirkung des Projektes auf Ökologie, Ökonomie und Soziokultur
- y_i = Relevanz des Themas für die Akzeptanz des Projektes bei Nutzenden und Betroffenen.

Durch die Herleitung des Gradienten existiert nur noch eine Kenngröße zur Beschreibung der Relevanz des Themas für die Gesamtnachhaltigkeit. Um nun einen prozentuellen Anteil zu ermitteln, wird der Quotient aus dem jeweiligen Gradienten des Themas und der Summe aller Gradienten nach folgender Gleichung gebildet:

$$\alpha_{krit,i} = \frac{NH - Grad_i}{\sum NH - Grad_i} * 100 [\%]$$

Mit:

- $NH - Grad_i$ = Gradient für das Nachhaltigkeitsthema i
- $\alpha_{krit,i}$ = Wichtungsfaktor des Nachhaltigkeitsthemas an der Gesamtnachhaltigkeit

A.2 Überblick Kriterien, Indikatoren, Erläuterung und angewandte Quantifizierungsmethode

Nachhaltigkeitsqualitäten und Querschnittsthemen	Hauptthema (Kriterium)	untergeordnetes Thema (Indikator)	Erläuterung	Quantifizierungsmethode
Ökologie	THG-Bilanz	-	Es erfolgt eine Bewertung der THG-Bilanzen der einzelnen Varianten auf Basis der THG-Last in t CO ₂ -Äq. der U-Bahn-Strecke je Variante	Methode B
	Ressourcenverbrauch	Verbau	Es erfolgt eine Bewertung der eingesetzten Verbaumengen für die Herstellung von Streckenabschnitten (nicht Haltestellen) je Variante in m ³ /m U-Bahn-Strecke	Methode C
		Menge Baustoffe	Es erfolgt die Bewertung der Menge an einzusetzenden Baustoffe für den erweiterten Rohbau (Beton, Bewehrungsstahl, Asphalt und Kies) je Variante in t/m U-Bahn-Strecke	Methode B
		Umbauter Raum (Aushub)	Es erfolgt eine Bewertung des umbauten Raumes (Aushub) je Variante in m ³ /m U-Bahn-Strecke	Methode B
		Flächenverbrauch	Es erfolgt eine Bewertung des bauzeitlichen Flächenverbrauchs sowie entgeltigen Flächenverbrauchs (= zusätzliche Versiegelung von Flächen ggü. dem heutigen Zustand) in m ² je Variante. Dies umfasst sowohl die VGF-Trasse, als auch jene Straßenflächen, die zusätzlich gebaut werden müssen. Eine eventuelle Entseigerung entfallender Straßenflächen wird im Zuge der Bewertung nicht berücksichtigt. Auch bereits versiegelte Flächen, die im Zuge der Bauarbeiten bzw. nach Abschluss der Bauarbeiten wiederhergestellt werden, werden nicht berücksichtigt. Grund hierfür ist, dass die Versiegelung der Fläche bereits vor dem Bauvorhaben bestand. Für alle 3 Varianten gilt die Berücksichtigung der Flächen (bauzeitlich und endgültig) bis zur W.-Epstein-Straße, da ab dort die Strecke nicht mehr differiert. Eine Unterscheidung beim bauzeitlichen Flächenverbrauch in versiegelte und nicht versiegelte Flächen ist nicht erfolgt	Methode C
	Hydrogeologie und Grundwasser	Grundwasserentnahme	Es erfolgt eine Beurteilung der Grundwasserentnahme (Fördermenge) in der Bauzeit je Variante	Methode C
		Grundwasservorkommen	Es erfolgt eine Bewertung der Auswirkungen auf oberflächennahe Grundwasservorkommen in der Bauzeit je Variante	Methode A
		Strömungssituation	Es erfolgt eine Bewertung der Veränderungen der Strömungssituation (Fließrichtungen) durch bauzeitige Grundwasserentnahmen je Variante	Methode A
		Barrierewirkung durch Bauwerke	Es erfolgt eine Bewertung der Barrierewirkung und Veränderung der Strömungssituation durch Bauwerke (permanente Wirkung) je Variante	Methode A
		Permanente Auswirkung Vegetation	Es erfolgt eine Bewertung der permanenten Auswirkungen auf die Vegetation je Variante	Methode A
		Permanente Auswirkung Wurzelzone	Es erfolgt eine Bewertung der permanenten Auswirkungen auf die effektiven Wurzelzonen von Bäumen durch Tunnelbauwerke je Variante	Methode A
		Wasserhaltung Vegetation	Es erfolgt eine Bewertung der zusätzlichen Auswirkungen der Wasserhaltung auf die Vegetation je Variante	Methode A
		Hydrochemische Beeinflussung Grundwasserqualität	Es erfolgt eine Bewertung der hydrochemischen Beeinflussung der Grundwasserqualität durch eingebrachte Baustoffe je Variante	Methode A
		Risiken Grundwasserverunreinigung	Es erfolgt eine Bewertung der Risiken einer Grundwasserverunreinigung im Abstom der Baufelder je Variante	Methode A
		Grundwasserreinigung	Es erfolgt eine Bewertung des Aufwands der Grundwasserreinigung vor Einleitung (geogene Beschaffenheit, anthropogene Verunreinigungen) je Variante	Methode A
		Oberflächengewässer	Es erfolgt eine Bewertung der Auswirkungen auf Oberflächengewässer je Variante	Methode C
		Auswirkung Biotope und Naturschutzgebiete	Es erfolgt eine Bewertung der Auswirkungen auf gesetzlich geschützte Biotope und Naturschutzgebiete je Variante	Methode A
		Einfluss Wärmeeintrag Wasserhaushalt	Es erfolgt eine Bewertung des Einfluss des Wärmeeintrages über die Tunnelröhren auf den Wasserhaushalt der durchwurzelten Bodenzone je Variante	Methode A
		Externe Grundwassernutzung	Es erfolgt eine Bewertung der Auswirkungen auf externe Grundwassernutzungen (Trinkwassergewinnung, Betriebsbrunnen, Notbrunnen, Geothermie) je Variante	Methode A
	Auswirkung auf Gebäude	Es erfolgt eine Bewertung der Auswirkungen auf Gebäude infolge der bauzeitigen Grundwasserentnahme je Variante	Methode A	
	Baumbestand	Bäume und waldartige Bestand	Es erfolgt eine Bewertung der Anzahl erfasster Bäume und waldartiger Bestände je Variante	Methode B
		Habitatbäume	Es erfolgt eine Bewertung der erfassten Habitatbäume je Variante	Methode C
		Zu fällende Bäume	Es erfolgt eine Bewertung der Anzahl zu fällender Bäume je Variante	Methode C
Akut gefährdete Bäume		Es erfolgt eine Bewertung der Anzahl akut gefährdeter Bäume je Variante	Methode C	

Nachhaltigkeitsqualitäten und Querschnittsthemen	Hauptthema (Kriterium)	untergeordnetes Thema (Indikator)	Erläuterung	Quantifizierungsmethode
Ökonomie	Baukosten	-	Es erfolgt eine Bewertung der Baukosten (Investitionskosten) der einzelnen Varianten auf Basis der Investitionskosten in / m U-Bahn-Strecke	Methode B
	Fördermittel	Förderfähigkeit	Es erfolgt eine Beurteilung, ob die Förderfähigkeit des Projekts garantiert werden kann	Methode A
	Lebenszykluskosten	-	Es erfolgt eine Bewertung des Kriteriums Lebenszykluskosten im Rahmen der Trassierungsentscheidung über die drei Parameter Nutzungsdauer Tunnel in Abhängigkeit der Bauweise (offen vs. geschlossen) gem. ABBV und des Einflusses der Bauart (Standardisierbarkeit und Reproduzierbarkeit) auf die Qualität und der in der Regel damit verbundenen Robustheit des Bauwerkes hinsichtlich notwendiger Unterhaltungs- und Instandsetzungsaufwände. Außerdem werden die Kurvenradien und deren Einfluss auf die Instandsetzung des Schienensystems bewertet	Methode A
Sozialkultur	Immissionen	Lärm und Erschütterung	Es erfolgt eine Bewertung der Beeinträchtigung von Anwohnern hinsichtlich Immissionen wie Lärm und Staub	Methode A
	Denkmal-schutz	-	Es erfolgt eine Beurteilung der Intensität des Eingriffes in denkmalgeschützte Bereiche / Flächen oder Gebäude	Methode A
	Sicherheit	-	Es erfolgt eine Bewertung anhand der Aspekte stadträumlich integrierte Lage, Wegeführung (auch in der Dunkelheit) und Angsträume entlang der Strecke sowie im Stationsbereich	Methode A
Städtebau und Standort	Städtebauliche Potenziale und Erschließung	Barrierewirkung der Trasse	Es erfolgt eine Bewertung der Aspekte optische Auswirkung und Auswirkung auf bestehende Verbindungen von Stadträumen je Variante	Methode A
		Vernetzung Stadträume	Es erfolgt eine Bewertung des Aspekts stadträumliche Integration der Station in die unmittelbare Umgebung je Variante	Methode A
		Anbindung / Verknüpfung mit anderer Verkehrsinfrastruktur (Linienbusse, Ringstraße)	Es erfolgt eine Bewertung der Anbindung / Verknüpfung mit anderer Verkehrsinfrastruktur, insbesondere von Linienbussen und der Ringstraße je Variante	Methode A
		Erschließung / Einzugsbereiche der Stationen	Es erfolgt eine Bewertung des Erschließungspotenzials und der Einzugsbereiche der Station hinsichtlich Wohnen, Arbeiten und bedeutender Institutionen je Variante	Methode A
	Verdichtung Stadtraum	-	Platz, freie Sicht und Grünflächen sind rar in städtischen Gebieten und doch von großer Bedeutung für eine hohe Lebensqualität. Anhaltende Entwicklungen wie die stetige Zunahme der Weltbevölkerung oder der Trend zur Urbanisierung tragen zur zunehmenden Verdichtung von (inner-)städtischen Räumen bei. Unterirdische Bauten können dieser Entwicklung entgegenwirken und wertvolle Nutzungs- und Lebensräume für Menschen, Tiere und Pflanzen an der Oberfläche bewahren. Dieses Kriterium bewertet den Anteil oberirdisch zu unterirdisch im Bezug auf die gesamte U-Bahn-Strecke je Variante	Methode D
	Bildung, Forschung und Entwicklung	Entwicklungs-potenzial Wissenschafts-standort Frankfurt	Die Bürger:innen, aber auch Besucher:innen der Stadt Frankfurt sollen Bildung, Forschung & Entwicklung als Teil der Stadtkultur und dessen Identität wahrnehmen und erleben können. Die Integration von Bildung, Forschung und Entwicklung in das gesellschaftliche Leben und den Alltag der Bürger:innen, ist hierzu von großer Bedeutung. Eine wichtige Voraussetzung ist die Präsenz des Wissenschaftsstandorts im Stadtbild und im Bewusstsein der Menschen. Stichwort: "Einbindung durch Anbindung". Die Bewertung erfolgt auf Basis einer direkten Anbindung des Campus Westend mit eigener Station	Methode A
	Beitrag Mobilitäts-wende	Verlagerte Fahrten vom MIV zum ÖPNV	Es erfolgt eine Bewertung der Verlagerung der Fahrten vom MIV zum ÖPNV (Personenfahrten je Werktag) je Variante	Methode B
		Induzierter Verkehr ÖPNV	Es erfolgt eine Bewertung des induzierten ÖPNV (Personenfahrten je Werktag) je Variante	Methode B
		Mehrverkehr ÖPNV	Es erfolgt eine Bewertung des Mehrverkehrs (ÖPNV) (Personenfahrten je Werktag) je Variante	Methode B
		Einsparung bei Busleistungen	Es erfolgt eine Bewertung der Einsparung bei Busleistungen je Variante	Methode A

Nachhaltigkeitsqualitäten und Querschnittsthemen	Hauptthema (Kriterium)	untergeordnetes Thema (Indikator)	Erläuterung	Quantifizierungsmethode
Prozesse	Baubedingte Eingriffe (bauzeitlich)	MIV-Flächen	Es erfolgt eine Bewertung der Auswirkung der bauzeitlichen, baubedingten Eingriffe auf MIV-Flächen je Variante	Methode A
		Kampfmittelrisiko	Es erfolgt eine Bewertung der bauzeitlichen, baubedingten Eingriffe auf das Kampfmittelrisiko je Variante	Methode A
		Rettungsweg / Andienung	Es erfolgt eine Bewertung der Einschränkung auf Rettungswege / Andienung durch bauzeitliche, baubedingte Eingriffe je Variante	Methode A
	Baubedingte Eingriffe (dauerhaft)	Naturschutz und Biodiversität	Es erfolgt eine Bewertung der Auswirkungen der dauerhaften, baubedingten Eingriffe auf Naturschutz und Biodiversität je Variante	Methode A
		Altlasten	Es erfolgt eine Bewertung des Risikos der dauerhaften, baubedingten Eingriffe bzgl. Altlasten je Variante	Methode A
	Bauweise	-	Es erfolgt eine Bewertung des Verhältnisses offener zu geschlossener Bauweise je Variante	Methode D

A.3 Qualitative Bewertung der Nachhaltigkeitsmatrix

		Qualitative Bewertung (inkl. Ampelsystem)		
Hauptthema (Kriterium)	untergeordnetes Thema (Indikator)	Variante 1a	Variante 1d	Variante 3i
THG-Bilanz	-	39701	25922	45238
Ressourcenverbrauch	Verbau	15	3,7	2,8
	Menge Baustoffe	78	46	62
	Umbauter Raum (Aushub)	54	46	59
	Flächenverbrauch	Der bauzeitliche Flächenverbrauch umfasst 86.400 m ² . Darin enthalten ist auch der endgültige Flächenverbrauch für Straße und Schiene, der 7.000 m ² für Straßen und 10.600 m ² für Schienen beträgt (=17.600 m ²).	Der bauzeitliche Flächenverbrauch umfasst 66.400 m ² . Darin enthalten ist auch der endgültige Flächenverbrauch für Straße und Schiene, der 7.000 m ² für Straßen und 10.800 m ² für Schienen beträgt (=17.800 m ²).	Der bauzeitliche Flächenverbrauch umfasst 19.100 m ² . Darin enthalten ist auch der endgültige Flächenverbrauch für Straße und Schiene, der 0 m ² für Straßen und 5.100 m ² für Schienen beträgt (=5.100 m ²).
	Grundwasserentnahme	<p>Der Bau erfolgt auf einer Länge von rd. 1.000 m als in offener Bauweise errichteter Tunnel. Bei diesem wird ein seitlicher Grundwasserzustrom durch dichte Verbauwände unterbunden. Zur Verringerung des Auftriebs erfolgt eine Sohllentspannung mittels Entspannungsbrunnen. Diese bewirken eine Absenkung des GW-Druckpotenzials in den Schichten unterhalb der vertikalen Verbauwände. Bei dem nach Süden einfallenden Tunnel nimmt die Potenzialabsenkung von der Rampe mit 0 m über die Einmündung Ditmarstraße (4 m) bis zum Bestandstunnel an der Bockenheimer Warte auf rd. 12 m zu. Folglich wird im südlichen Abschnitt die stärkste Grundwasserförderung aus den Festgesteinschichten der Niederrad-Formation erwartet.</p> <p>Für die Unterquerung der BAB66 wird auf einer Länge von rd. 70 m eine Einschnürung des oberflächennahen Grundwasserleiters, jedoch voraussichtlich keine relevante Sohllentspannung erforderlich.</p> <p>An den Brückenfundamenten im Bereich der Station Botanischer Garten wird allenfalls in den tieferen Geländeeinschnitten eine geringe Wasserhaltung aus den Sandschichten der Staden-Formation erforderlich.</p> <p>Folgende Förderraten wurden gemäß Grundwassermodell berechnet: Tunnel offene Bauweise (oB): 54,7 m³/d - 99.800 m³ gesamt Unterquerung BAB66 und Brückenfundamente: keine Entnahme</p>	<p>Der Bau erfolgt auf einer Länge von rd. 100 m als in offener Bauweise errichteter Tunnel. Bei diesem wird ein seitlicher Grundwasserzustrom durch dichte Verbauwände unterbunden. Zur Verringerung des Auftriebs erfolgt eine Sohllentspannung mittels Entspannungsbrunnen. Diese bewirken eine Absenkung des GW-Druckpotenzials in den Schichten unterhalb der vertikalen Verbauwände. Bei dem nach Süden einfallenden Tunnel nimmt die Potenzialabsenkung von der Rampe mit 0 m bis zur Einmündung des maschinell errichteten Tunnels auf rd. 8 m zu. Folglich wird im südlichen Abschnitt des offenen Tunnels die stärkste Grundwasserförderung aus den Festgesteinschichten der Niederrad-Formation erwartet.</p> <p>Für die Unterquerung der BAB66 wird auf einer Länge von rd. 70 m eine Einschnürung des oberflächennahen Grundwasserleiters, jedoch voraussichtlich keine relevante Sohllentspannung erforderlich.</p> <p>An den Brückenfundamenten im Bereich der Station Botanischer Garten wird allenfalls in den tieferen Geländeeinschnitten eine geringe Wasserhaltung aus den Sandschichten der Staden-Formation erforderlich.</p> <p>Im Bereich der in geschlossener Bauweise errichteten Tunnelröhren wird abgesehen vom Lenzwasser keine Grundwasserentnahme erforderlich.</p> <p>Die Notausstiege schneiden deutlich in den Grundwasserkörper ein, sodass eine grundwasserschonende Bauweise ohne Grundwasserentnahme vorzusehen ist (z.B. Vereisung, Unterwasserbetonsohle, Druckluftersatz).</p> <p>Förderraten gemäß Grundwassermodell: Tunnel oB/Rampe: 17,7 m³/d - 18.400 m³ gesamt Unterquerung BAB66 und Brückenfundamente: keine Entnahme</p>	<p>Die Startbaugrube im Nordwesten der Miquelanlage wird auf einer Länge von rd. 100 m als in offener Bauweise errichteter Tunnel gebaut. Bei diesem wird ein seitlicher Grundwasserzustrom durch dichte Verbauwände unterbunden. Die anstehenden Sande der Staden-Formation müssen vollständig abgedichtet werden. Zur Verringerung des Auftriebs erfolgt eine Sohllentspannung mittels Entspannungsbrunnen. Diese bewirken eine Absenkung des GW-Druckpotenzials in den Schichten unterhalb der vertikalen Verbauwände. Bei dem nach Süden einfallenden Tunnel nimmt die Potenzialabsenkung von der Rampe mit 0 m bis zur Einmündung des maschinell errichteten Tunnels auf rd. 2-3 m zu. Folglich wird im südlichen Abschnitt des offenen Tunnels die stärkste Grundwasserförderung aus den Festgesteinschichten der Niederrad-Formation erwartet.</p> <p>An der geplanten Station Campus ist die erforderliche Grundwasserabsenkung in der Niederrad-Formation mit rd. 0,5 - 2 m ebenfalls nur sehr gering, sodass nur eine geringe Förderrate zu erwarten ist.</p> <p>Im Bereich der in maschineller Bauweise errichteten Tunnelröhren wird abgesehen vom Lenzwasser keine Grundwasserentnahme erforderlich.</p> <p>Die Notausstiege schneiden deutlich in den Grundwasserkörper ein, sodass eine grundwasserschonende Bauweise ohne Grundwasserentnahme vorzusehen ist (z.B. Vereisung, Unterwasserbetonsohle, Druckluftersatz).</p> <p>Förderraten gemäß Grundwassermodell: Tunnel oB/Rampe: 13,5 m³/d - 24.600 m³ gesamt Station Campus: 8,1 m³/d - 11.800 m³ gesamt</p>

		Qualitative Bewertung (inkl. Ampelsystem)		
Hauptthema (Kriterium)	untergeordnetes Thema (Indikator)	Variante 1a	Variante 1d	Variante 3i
	Grundwasservorkommen	Infolge der Barrierewirkung des Tunnels offene Bauweise (oB) ist in den geringmächtigen quartären Deckschichten südöstlich der Trasse im Bereich des Palmengartens eine Abschnürung des Grundwasserzufflusses zu erwarten. Infolge einer Grundwasserabsenkung in den tieferen Festgesteinsschichten in der Bauzeit kann zudem eine Wiedergängung aus den quartären Deckschichten über Verwerfungen und Klüfte nicht ausgeschlossen werden. Ein partielles Trockenfallen der oberflächennahen Grundwasservorkommen des nördlichen Palmengartens ist möglich. Die Flurabstände sind in den Senken des Palmengartens teilweise vegetationsrelevant.	Infolge der Barrierewirkung der Bauwerke sind zwar geringfügige Grundwasserstandsänderungen zu erwarten, doch erreichen diese nur eine geringe Intensität und sind nicht vegetationsrelevant. Infolge der bauzeitigen Potenzialabsenkung im Bereich des Tunnels offene Bauweise (oB) bzw. der Rampe ist im Umfeld eine Wiedergängung des geförderten Grundwassers aus oberflächennahen Grundwasservorkommen nicht auszuschließen. Allerdings sind in den betroffenen Bereichen keine vegetationsrelevanten Flurabstände vorhanden und die potenzielle Wirkung ist aufgrund der geringen Förderrate sehr gering.	Infolge der Barrierewirkung der Bauwerke sind zwar geringfügige Grundwasserstandsänderungen zu erwarten, doch erreichen diese nur eine geringe Intensität und sind nicht vegetationsrelevant. Infolge der bauzeitigen Potenzialabsenkung im Bereich der Startbaugrube bzw. der Rampe ist im Umfeld eine Wiedergängung des geförderten Grundwassers aus oberflächennahen Grundwasservorkommen - hier aus den Sanden der Staden-Formation zu erwarten. Aufgrund der erwarteten geringen Potenzialabsenkung und Förderrate ist die Wirkung auf das Umfeld in Bereichen mit einem vegetationsrelevanten Flurabstand mit bis zu rd. 0,25 m allerdings gering. An der Baugrube der Station Campus Westend ist aufgrund der geringen erwarteten Potenzialabsenkung bzw. Förderrate kaum eine hydraulische Wirkung für oberflächennahe Grundwasservorkommen zu erwarten. Die Grundwasserflurabstände in der Basalt- und Staden-Formation sind im näheren Umfeld mit > 4,3 m nicht vegetationsrelevant. Grundwasser der quartären Deckschichten ist nicht betroffen.
	Strömungssituation	Infolge der bauzeitigen Potenzialabsenkung im Bereich des Tunnels offene Bauweise und der vergleichsweise großen Förderraten ist im weiteren Umfeld eine Veränderung der Fließrichtungen zur Baugrube zu erwarten. Die Veränderung betrifft im Wesentlichen den Klüftgrundwasserleiter der Niederrad-Formation. Im südlichen Abschnitt des Tunnels oB nimmt die Reichweite der Fließrichtungsänderung zu. Die Grundwasservorkommen des Quartärs sowie der Basalt- und Staden-Formation sind mittels der Verbauwände gegen die Baugruben abgedichtet. Eine Veränderung der Fließrichtungen erfolgt durch eine Verschwenkung der oberflächennahen Strömung nach Süden oder indirekt im Falle einer verstärkten Aussickerung in das tiefere Grundwasserstockwerk (Niederrad-Formation).	Infolge der bauzeitigen Potenzialabsenkung im Bereich des Tunnels offene Bauweise bzw. der Rampe ist im weiteren Umfeld eine Veränderung der Fließrichtungen zur Baugrube zu erwarten. Die Veränderung betrifft im Wesentlichen die Niederrad-Formation. Aufgrund der geringen Förderrate ist die Änderung in der Bauzeit nur gering. Eine Beeinflussung von Grundwassernutzungen im Grundwasserleiter der Niederrad-Formation ist nicht gegeben.	Veränderungen der Strömungsrichtungen infolge der bauzeitigen Wasserhaltung beschränken sich aufgrund der geringen Absenkungsbeträge auf die unmittelbaren Nahbereiche des Tunnels offene Bauweise bzw. der Rampe sowie der Station. Betroffen ist jeweils die Niederrad-Formation. Die höheren Grundwasserleiter der Basalt- und Staden-Formation sind durch die Entnahmen mit einer Absenkung von etwa 0,25 m nur geringfügig betroffen. Eine Beeinflussung von Grundwassernutzungen im Grundwasserleiter der Niederrad-Formation ist nicht gegeben.
	Barrierewirkung durch Bauwerke	Die vertikalen Verbauwände verbleiben wie das Tunnelbauwerk im Untergrund und bilden eine hydraulische Barriere. Betroffen von der Stauwirkung ist vor allem die Niederrad-Formation im südlichen Abschnitt der Miquelallee, da das Bauwerk hier auf einer Länge von etwa 350 m quer zur Strömungsrichtung angeordnet ist. Im südöstlichen Abstrom und damit im Bereich des Palmengartens resultiert eine Abschnürung des oberflächennahen Grundwasserzustroms und damit ein zusätzliches Trockenfallen. Auf der nordwestlichen Zuströmseite ist ein erheblicher Aufstau von bis zu 3 m zu erwarten.	Die vertikalen Verbauwände des Tunnels offene Bauweise bzw. der Rampe verbleiben im Untergrund und bilden eine hydraulische Barriere. Betroffen von der Stauwirkung ist allein die Niederrad-Formation. Da vorwiegend eine südliche Strömungsrichtung vorherrscht, ist die Barrierewirkung eher gering. So erreicht die Absenkung auf der Westseite einen Betrag von bis zu 0,5 m und der Anstieg am Botanischen Garten eine vergleichbare Intensität. Für die maschinell errichteten Tunnelröhren ist ebenfalls eine Barrierewirkung zu erwarten, jedoch ist diese aufgrund der Unter- und Überströmung auf den Nahbereich der Röhren beschränkt. Relevante permanente Veränderungen in den oberflächennahen Schichten der Niederrad-Formation sind infolge der Überströmung nicht zu erwarten.	Die vertikalen Verbauwände der Startbaugrube bzw. der Rampe verbleiben wie das Tunnelbauwerk im Untergrund und bilden eine hydraulische Barriere. Betroffen von der Stauwirkung ist vor allem die Staden-Formation, da das Bauwerk hier auf einer Länge von etwa 100 m quer zur Strömungsrichtung angeordnet ist. Die Wasserstandsänderung ist mit < 0,25 m jedoch nur gering. Der Grundwasserflurabstand in der Staden-Formation beträgt etwa 9 - 11 m, sodass keine Betroffenheit von Gebäuden oder der Vegetation zu erwarten ist. Bei einer grundwassererfüllten Mächtigkeit von 5 - 6 m wird das Bauwerk im Norden und Süden umströmt. An der Station Campus wird die nach Westen gerichtete Strömung in der Basalt- und Staden-Formation auf einer Länge von rd. 110 m vollständig unterbunden. Die Stauwirkung ist dabei auf < 0,5 m begrenzt. Bei einer grundwassererfüllten Mächtigkeit von 6 - 8 m wird das Bauwerk im Norden und Süden umströmt. Der Grundwasserflurabstand beträgt etwa 5 m, sodass keine Betroffenheit von Gebäuden oder der Vegetation zu erwarten ist. Für die maschinell errichteten Tunnelröhren ist ebenfalls eine Barrierewirkung zu erwarten, jedoch ist diese aufgrund der Unter- und Überströmung auf den Nahbereich der Röhren beschränkt. Relevante permanente Veränderungen in den oberflächennahen Schichten der Niederrad-Formation sind infolge der erwarteten Überströmung nicht zu erwarten.

Hauptthema (Kriterium)	untergeordnetes Thema (Indikator)	Qualitative Bewertung (inkl. Ampelsystem)		
		Variante 1a	Variante 1d	Variante 3i
	Permanente Auswirkung Vegetation	Der Grundwasserflurabstand im Abstrom des Tunnels oB beträgt in den anstehenden Schichten der Niederrad-Formation > 5 m (Ausgangszustand). Die erwartete Grundwasserabsenkung ist somit nicht vegetationsrelevant. Hingegen führt die Abschnürung des Zustroms in den oberflächennahen Schichten zu einem zusätzlichen Trockenfallen der Deckschichten im nördlichen Palmengarten, welches für die Vegetation relevant sein kann.	Der Grundwasserflurabstand im Abstrom des Tunnels oB beträgt in den anstehenden Schichten der Niederrad-Formation > 5 m (Ausgangszustand). Die erwartete Grundwasserstandsänderung ist somit nicht vegetationsrelevant. Allein in der Uferzone des Teiches im Botanischen Garten kann ein Anstieg und damit eine Verbesserung der Wasserversorgung gegeben sein.	Im östlichen Zustrom auf die Startbaugrube bzw. Rampe entsteht eine geringe Aufspiegelung. Aufgrund der großen Flurabstände (> 5 m) der Staden-Formation ist diese nicht vegetationsrelevant. Im unmittelbaren Abstrom liegen keine Grünflächen. Der Grundwasserflurabstand im Abstrom der Station Campus beträgt in den anstehenden Schichten der Staden-Formation > 5 m (Ausgangszustand). Die erwartete Grundwasserabsenkung ist somit nicht vegetationsrelevant.
	Permanente Auswirkung Wurzelzone	Bäume bzw. Neuanpflanzungen sind oberhalb der Tunnelbauwerke voraussichtlich nicht gegeben.	Die Oberkanten (Firste) der maschinell errichteten Tunnel liegen unmittelbar südlich des Startbauwerks auf einer Länge von bis zu 50 m in einer Tiefe von weniger als 4,3 m. Dadurch kann der kapillare Aufstieg in die effektive Wurzelzone gemindert sein. Der Bereich wird durch Gewächshäuser genutzt, Grünflächen bzw. Bäume sind nicht vorhanden. Der Bereich weist einen Flurabstand > 5 m auf, sodass keine Verschlechterung des Bodenwasserhaushalts zu erwarten ist. Im weiteren Tunnelverlauf liegen die Firste stets deutlich unterhalb der effektiven Wurzelzone.	Die Oberkanten (Firste) der maschinell errichteten Tunnel liegen unmittelbar südlich des Startbauwerks auf einer Länge von bis zu etwa 30 m in einer Tiefe von weniger als 4,3 m. Dadurch kann der kapillare Aufstieg in die effektive Wurzelzone gemindert sein. Der Bereich an der Westseite der Miquelanlage ist heute von Bäumen bestanden, weist jedoch einen Flurabstand > 5 m auf, sodass keine Verschlechterung des Bodenwasserhaushalts zu erwarten ist. Im weiteren Tunnelverlauf liegen die Firste stets deutlich unterhalb der effektiven Wurzelzone.
	Wasserhaltung Vegetation	Aufgrund der geringen Vertikaldurchlässigkeit sind die oberflächennahen Schichten vorrangig von der Barrierewirkung des Tunnels offene Bauweise betroffen. Dennoch führt die verstärkte Wiedergängung aus den Deckschichten zu einer leichten Ausweitung der Grundwasserabsenkung im nördlichen Palmengarten. Der Bereich ist durch vegetationsrelevante Flurabstände gekennzeichnet, sodass zusätzliche Auswirkungen in der Bauzeit möglich sind.	Die hydraulische Wirkung resultiert in den oberflächennahen Schichten im Wesentlichen aus der Barrierewirkung der Bauwerke. Zusätzliche Auswirkungen der Grundwasserentnahme sind vernachlässigbar gering. Bereiche mit vegetationsrelevanten Flurabständen sind nicht durch eine Grundwasserabsenkung betroffen.	Die bauzeitige GW-Entnahme führt im Umfeld der Startbaugrube zu einer moderaten Aufweitung der Grundwasserabsenkung im oberflächennahen Grundwasserleiter der Staden-Formation. Diese bleibt mit einem Gesamtbetrag von bis zu rd. 0,3 m jedoch gering. Bereiche mit vegetationsrelevanten Flurabständen sind im Umfeld des Teiches der Miquelanlage mit bis zu 0,25 m betroffen. Im Umfeld des Stationsbauwerks erfolgt eine lediglich schwache Ausweitung der Grundwasserabsenkung, welche einen Gesamtbetrag von 0,25 m nicht übersteigt. Bereichen mit vegetationsrelevanten Flurabständen sind nicht betroffen.

Hauptthema (Kriterium)	untergeordnetes Thema (Indikator)	Qualitative Bewertung (inkl. Ampelsystem)		
		Variante 1a	Variante 1d	Variante 3i
	Hydrochemische Beeinflussung Grundwasserqualität	Eine hydrochemische Beeinflussung ist im Abstrom des Tunnels offene Bauweise in Form einer Veränderung des pH-Wertes und der Karbonathärte zu erwarten. Im Zuge des Einbaus von Bohrpfählen oder einer Schlitzwand sind zudem Trübungen des Grundwassers sowie eine Erwärmung (Hydratationswärme) im Abstrom zu erwarten. Betroffen sind vorrangig die oberflächennahen Schichten der Niederrad-Formation südlich der Miquelallee und westlich der Zeppelinallee. Im südlichen Abschnitt ist ein Bereich mit größerer Quartärmächtigkeit bei einer südlichen Fließrichtung betroffen. Die potenzielle Veränderung betrifft somit das oberflächennahe Grundwasservorkommen des nördlichen Palmengartens. Aufgrund der großen durchteuften Mächtigkeit der vertikalen Umschließungen und der großen Länge der Baugrube ist die Wirkung größer als bei den übrigen Varianten. Üblicherweise geht die Wirkung einige Monate nach der Einbringung wieder zurück.	Eine hydrochemische Beeinflussung ist im Abstrom des Tunnels offene Bauweise bzw. der Rampe in Form einer Veränderung des pH-Wertes und der Karbonathärte zu erwarten. Im Zuge des Einbaus von Bohrpfählen oder der Schlitzwand sind zudem Trübungen des Grundwassers sowie eine Erwärmung (Hydratationswärme) im Abstrom zu erwarten. Betroffen sind vorrangig die oberflächennahen Schichten der Niederrad-Formation im Bereich des nördlichen Palmengartens sowie in den westlichen Randlagen des Botanischen Gartens. Eine zusätzliche hydrochemische Wirkung geht von den Betonoberflächen der Tunnelröhren aus. Da die Tübbinge bereits als Betonfertigteile eingebaut werden, ist die Wirkung jedoch geringer als bei dem (flüssig) eingebauten Beton der Dicht-/Bohrpflhwände. Zudem sind gemäß der tieferen Gradienten nur die tieferen Festgesteinsschichten unterhalb des Palmengartens betroffen. Üblicherweise geht die Wirkung einige Monate nach der Einbringung wieder zurück. Da vorrangig die kalkhaltigen Schichten des Festgesteins betroffen sind, ist die Wirkung der pH-Wert-Veränderung gering.	Eine hydrochemische Beeinflussung ist im Abstrom der Startbaugrube bzw. der Rampe sowie der Station Campus in Form einer Veränderung des pH-Wertes und der Karbonathärte zu erwarten. Im Zuge des Einbaus von Bohrpfählen oder der Schlitzwand sind zudem Trübungen des Grundwassers sowie eine Erwärmung (Hydratationswärme) im Abstrom zu erwarten. Betroffen sind vorrangig die oberflächennahen Schichten der Staden-Formation westlich der Rampe und westlich der Station. Eine zusätzliche hydrochemische Wirkung geht von den Betonoberflächen der Tunnelröhren aus. Da die Tübbinge bereits als Betonfertigteile eingebaut werden, ist die Wirkung jedoch geringer als bei dem (flüssig) eingebauten Beton der Dicht-/Bohrpflhwände. Zudem sind gemäß der tieferen Gradienten vor allem die tieferen Festgesteinsschichten betroffen. Üblicherweise geht die Wirkung einige Monate nach der Einbringung wieder zurück.
	Risiken Grundwassercontamination	In den Baufeldern außerhalb der umschlossenen Baugruben ist von einem Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (Kraftstoffe, Schmierstoffe, Baustoffe) auszugehen, sodass ein Risiko von Handhabungsverlusten und Leckagen zu berücksichtigen ist. Eine unterschiedliche Gewichtung der Varianten kann bei dem bisherigen Planungsstand noch nicht erfolgen. Es wird ein hydrochemisches Monitoring im unmittelbaren Grundwasserabstrom der Baufelder empfohlen.		
	Grundwasserreinigung	Bei der Untersuchung der im Vorhabensbereich vorhandenen Grundwassermessstellen ergaben sich keine Hinweise auf eine erhöhte Mineralisation des Grundwassers. Im Wasser ist geogenes Sulfid (l. fr.) nicht oder nur in Spuren (0,2 mg/L) nachweisbar. Anthropogene Verunreinigungen beschränken sich auf geringe Spuren von LCKW. Im Zustrom der Baugruben sind keine Grundwassercontaminationen bekannt. Ein Einfluss von Tiefenwasser mit erhöhter Natriumchlorid-Konzentration war an keiner Messstelle nachweisbar. Es entsteht voraussichtlich kein erhöhter Aufwand für die Grundwasserreinigung.	Bei der Untersuchung der im Vorhabensbereich vorhandenen Grundwassermessstellen ergaben sich keine Hinweise auf eine erhöhte Mineralisation des Grundwassers. Im Wasser ist geogenes Sulfid (l. fr.) nicht nachweisbar. Anthropogene Verunreinigungen beschränken sich auf geringe Spuren von LCKW sowie Chrom. Im Zustrom der Baugruben sind keine Grundwassercontaminationen bekannt. Ein Einfluss von Tiefenwasser mit erhöhter Natriumchlorid-Konzentration war an keiner Messstelle nachweisbar. Es entsteht voraussichtlich kein erhöhter Aufwand für die Grundwasserreinigung.	Bei der Untersuchung der im Vorhabensbereich vorhandenen Grundwassermessstellen ergaben sich keine Hinweise auf eine erhöhte Mineralisation des Grundwassers. Im Wasser ist geogenes Sulfid (l. fr.) nicht nachweisbar. Anthropogene Verunreinigungen beschränken sich auf geringe Spuren von LCKW und Chrom, daneben Arsen, Blei und Nickel oberhalb der geltenden Grenzwerte. Im Zustrom der Baugruben sind keine Grundwassercontaminationen bekannt. Ein Einfluss von Tiefenwasser mit erhöhter Natriumchlorid-Konzentration war an keiner Messstelle nachweisbar. Die erhöhten Schwermetallkonzentrationen im Bereich der Station Campus Westend bedürfen voraussichtlich einer geeigneten Reinigungsstufe. Aufgrund der erwarteten geringen Förderraten ist der Aufwand jedoch begrenzt.
	Oberflächengewässer	Da der Weiher im Palmengarten über keinen Grundwasseranschluss verfügt, sind keine Auswirkungen zu erwarten. In der Bauzeit erfolgt mit bis zu 0,5 m eine relevante Grundwasserabsenkung in den Schichten der Niederrad-Formation im nördlichen Zustrom auf den Teich im Botanischen Garten. Soweit über oberflächennahe Schichten ein zeitweiliger Zulauf erfolgt, kann dadurch eine Minderung des Zulaufs eintreten.	In der Bauzeit erfolgt eine Grundwasserabsenkung von bis zu rd. 0,25 m in den Schichten der Niederrad-Formation im nördlichen Zustrom auf den Teich im Botanischen Garten. Soweit über oberflächennahe Schichten ein zeitweiliger Zulauf erfolgt, kann damit eine Minderung des Wasseraustauschs eintreten.	Da der Teich in der Miquelanlage über keinen Grundwasseranschluss verfügt, sind keine Auswirkungen zu erwarten. Weitere Teiche sind nicht betroffen.
	Auswirkung Biotope und Naturschutzgebiete	In den von einer Grundwasserstandsänderung betroffenen Bereichen sind keine gesetzlich geschützten Biotope und Naturschutzgebiete vorhanden.		
	Einfluss Wärmeeintrag Wasserhaushalt	Bei einer mittleren Temperatur der Tunnel von 13 - 15 °C ist keine relevante Differenz zur Grundwassertemperatur (12,6 - 16 °C) gegeben. Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt sind nicht zu erwarten.		
	Externe Grundwassernutzung	In der Bauzeit ist mit einer relevanten Grundwasserabsenkung am Betriebsbrunnen des Palmengartens von rd. 0,75 zu rechnen, welcher mit Nutzungseinschränkungen einher gehen kann. Der Notbrunnen VII ist nur in geringem Maße (-0,4 m) betroffen. Das Risiko einer potenziellen hydrochemischen Beeinflussung der Brunnen ist aufgrund der Entfernung von rd. 300 zum Bauwerk voraussichtlich gering.	In der Bauzeit ist mit keiner messbaren Grundwasserabsenkung am Betriebsbrunnen des Palmengartens oder dem Notbrunnen VII zu rechnen. Die potenzielle hydrochemische Beeinflussung ist aufgrund der Entfernung von rd. 200 zum maschinell errichteten Tunnel voraussichtlich gering.	In der Bauzeit ist mit einer geringen Grundwasserabsenkung von bis zu 0,25 m am Betriebsbrunnen der Goethe-Universität zu rechnen, welcher voraussichtlich nicht zu Nutzungseinschränkungen führen wird. Eine hydrochemische Beeinflussung des Brunnens ist aufgrund der Entfernung von rd. 200 zum maschinell hergestellten Tunnel voraussichtlich nicht gegeben. Da der Brunnen zukünftig lediglich zu Bewässerungszwecken eingesetzt wird, sind die potenziellen Veränderungen auch nicht relevant.

Hauptthema (Kriterium)	untergeordnetes Thema (Indikator)	Qualitative Bewertung (inkl. Ampelsystem)		
		Variante 1a	Variante 1d	Variante 3i
Hydrogeologie und Grundwasser	Auswirkung auf Gebäude	Eine Schädigung von Bestandsgebäuden kann bei einer Grundwasserabsenkung in setzungsempfindlichen Schichten entstehen. Auf der bebauten Westseite der Trasse ist vorrangig ein Aufstau von bis zu 3 m zu erwarten, sodass auf eine Vernässung von Kellergeschossen zu prüfen ist.	Aufgrund der geringen Potenzialänderungen von bis zu 0,5 m sind keine relevanten Auswirkungen auf Gebäude zu erwarten.	Aufgrund der geringen Potenzialänderungen von bis zu 0,5 m sind keine relevanten Auswirkungen auf Gebäude zu erwarten.
Baumbestand	Bäume und waldartige Bestand	3.528	3.503	2.159
	Habitatbäume	20	21	0
	Zu fällende Bäume	3.060	2.894	713
	Akut gefährdete Bäume	468	413	174
Baukosten	-	296.520.000	299.880.000	404.145.000
Fördermittel	Förderfähigkeit	förderfähig da NKU-Abschätzung >1,0	förderfähig da NKU-Abschätzung >1,0	förderfähig da NKU-Abschätzung >1,0
Lebenszykluskosten Bauwerk	-	Der Anteil der offenen Bauweise am gesamten Tunnelbau beträgt 100%. Die offene Bauweise ist u.a. durch die klimatischen Einflüsse in der Regel höheren Risiken hinsichtlich Robustheit und Ausführung ausgesetzt. Die Robustheit in der Ausführungsqualität hat auch Einflüsse auf die notwendigen Aufwände in der Wartung und Instandhaltung. Die theoretische Nutzungsdauer eines Tunnels, der in offener Bauweise hergestellt wird beträgt nach ABBV: 90 Jahre. Radienbereiche, die über 600 m betragen, wirken sich kaum auf die Instandsetzungskosten aus.	Der Anteil der offenen Bauweise am gesamten Tunnelbau beträgt 40%, der Anteil der geschlossenen Bauweise am gesamten Tunnelbau beträgt 60%. Während die offene Bauweise u.a. durch die klimatischen Einflüsse in der Regel höheren Risiken hinsichtlich Robustheit und Ausführung ausgesetzt ist, kann eine Herstellung von Tunnelementen in geschlossener Bauweise und TVM als fertigteile in standardisierter Form unter gleichbleibenden Bedingungen erfolgen. Die Robustheit in der Ausführungsqualität hat auch Einflüsse auf die notwendigen Aufwände in der Wartung und Instandhaltung. Die theoretische Nutzungsdauer eines Tunnels, der in offener Bauweise hergestellt wird beträgt nach ABBV: 90 Jahre. Die theoretische Nutzungsdauer eines Tunnels, der in geschlossener Bauweise hergestellt wird beträgt nach ABBV: 130 Jahre. Radienbereiche, die über 600 m betragen, wirken sich kaum auf die Instandsetzungskosten aus.	Der Anteil der offenen Bauweise am gesamten Tunnelbau beträgt 3%, der Anteil der geschlossenen Bauweise am gesamten Tunnelbau beträgt 97%. Während die offene Bauweise u.a. durch die klimatischen Einflüsse in der Regel höheren Risiken hinsichtlich Robustheit und Ausführung ausgesetzt ist, kann eine Herstellung von Tunnelementen in geschlossener Bauweise und TVM als fertigteile in standardisierter Form unter gleichbleibenden Bedingungen erfolgen. Die theoretische Nutzungsdauer eines Tunnels, der in offener Bauweise hergestellt wird beträgt nach ABBV: 90 Jahre. Die theoretische Nutzungsdauer eines Tunnels, der in geschlossener Bauweise hergestellt wird beträgt nach ABBV: 130 Jahre. Radienbereiche, die unter 300 bis 400 m betragen, wirken sich deutlich auf die Instandsetzungskosten aus.
Immissionen	Lärm und Erschütterung	Durch offene Bauweise in der Miquellallee und Zeppellinallee sowie zur Herstellung der oberirdischen Strecke sind erhebliche Auswirkungen durch Lärm und Erschütterungen aus dem Baubetrieb zu erwarten.	Im Bereich der Startbaugrube (Zeppellinallee/ Botanischer Garten), am Notausstieg sowie zur Herstellung der oberirdischen Strecke sind Auswirkungen durch Lärm und Erschütterungen aus dem Baubetrieb zu erwarten -> größere direkte Auswirkungen auf Gärtnergebäude, ansonsten Auswirkungen mittel bis hoch.	Im Bereich der Startbaugrube (Miguelanlage) sowie an den Notausstiegen sind Auswirkungen durch Lärm und Erschütterungen aus dem Baubetrieb zu erwarten -> Auswirkungen sehr begrenzt.
Denkmalschutz	-	Miquellallee und Zeppellinallee mit teilweise denkmalgeschützten, angrenzenden Gebäuden durch Risiko stark betroffen.	Im Bereich der Startbaugrube (Zeppellinallee/ Botanischer Garten) sind direkte Auswirkungen auf Gärtnergebäude vorhanden. Denkmalschutz betroffen?	Im Bereich der Startbaugrube (Miguelanlage) sind keine Auswirkungen auf den Denkmalschutz erkennbar.
Sicherheit	-	Entstehung von Angsträumen entlang und unterhalb der Hochstraßen inkl. der neuen Station "Botanischer Garten". Unsichere Wegeführung zw. "Botanischer Garten" und Campus Westend: geringe Einsehbarkeit der Wege, Beleuchtung problematisch (Insektenschutz im Park)	Entstehung von Angsträumen entlang und unterhalb der Hochstraßen inkl. der neuen Station "Botanischer Garten". Unsichere Wegeführung zw. "Botanischer Garten" und Campus Westend: geringe Einsehbarkeit der Wege, Beleuchtung problematisch (Insektenschutz im Park)	Keine Entstehung von Angsträumen im Bereich der unterirdischen Streckenführung und der Station "Campus Westend". Sichere Wegeführung auch in der Dunkelheit möglich. Integrierte Lage mit hohem Publikumsverkehr schafft Sicherheit.

Hauptthema (Kriterium)	untergeordnetes Thema (Indikator)	Qualitative Bewertung (inkl. Ampelsystem)		
		Variante 1a	Variante 1d	Variante 3i
Städtebauliche Potenziale und Erschließung	Barrierewirkung der Trasse	Hohe Barrierewirkung durch die oberirdische Trassenausführung zwischen Bockenheim Nord, Botanischer Garten und Bundesbank (geführt in großen Teilen in Hochlage). Verstärkung der negativen stadträumlichen Auswirkung der vorhandenen Trasse der RLS	Hohe Barrierewirkung durch die oberirdische Trassenausführung zwischen Bockenheim Nord, Botanischer Garten und Bundesbank (geführt in großen Teilen in Hochlage). Verstärkung der negativen stadträumlichen Auswirkung der vorhandenen Trasse der RLS	Keine optische oder tatsächliche Barrierewirkung der neuen Trasse südlich der Miquelallee. Eine Barrierewirkung zwischen Miquelallee und Bundesbank könnte zudem durch Verlängerung des Tunnelbauwerks ausgeschlossen werden.
	Vernetzung Stadträume	Weder aktuell noch perspektivisch ist eine stadträumliche Integration der Station "Botanischer Garten" gegeben.	Weder aktuell noch perspektivisch ist eine stadträumliche Integration der Station "Botanischer Garten" gegeben.	Eine unterirdische Station "Campus Westend" liegt optimal integriert im Zentrum der Goethe Universität. Aus stadtplanerischer Sicht könnte eine Station im nördlichen Campusbereich Vorteile bieten und ggf. in offener Bauweise erfolgen.
	Anbindung / Verknüpfung mit anderer Verkehrsinfrastruktur (Linienbusse, Ringstraße)	6162: Die Anbindung an die Ringstraßenbahn ist durch die Lage der Station Bundesbank gegeben. Bauzeitlich durch die offene Bauweise gravierender Eingriff in den MIV Zeppelinallee - Miquelallee	6162: Die Anbindung an die Ringstraßenbahn ist durch die Lage der Station Bundesbank gegeben.	6162: Die Anbindung an die Ringstraßenbahn ist durch die Lage der Station Bundesbank gegeben.
	Erschließung / Einzugsbereiche der Stationen	Die Station "Botanischer Garten" liegt abseits aller Wohnsiedlungen, Arbeitsstätten und Bildungseinrichtungen. Folge: Geringe Frequentierung durch zu lange Wege durch Grünanlagen /wenig attraktive Verkehrsräume. Insbesondere der Campus Westend erhält bei dieser Trassenführung keine befriedigende Erschließung. Weder trägt diese Station zur Anbindung bestehender Stadtquartiere bei, noch birgt sie das Potential zukünftiger Entwicklungen.	Die Station "Botanischer Garten" liegt abseits aller Wohnsiedlungen, Arbeitsstätten und Bildungseinrichtungen. Folge: Geringe Frequentierung durch zu lange Wege durch Grünanlagen /wenig attraktive Verkehrsräume. Insbesondere der Campus Westend erhält bei dieser Trassenführung keine befriedigende Erschließung. Weder trägt diese Station zur Anbindung bestehender Stadtquartiere bei, noch birgt sie das Potential zukünftiger Entwicklungen.	Optimale Erschließung des Campus Westend (Goethe Universität und wissenschaftliche Institute), gute Anbindung der nahe gelegenen schulische Einrichtungen und Wohngebiete
Verdichtung Stadtraum	-	Circa 37% der U-Bahn-Strecke verläuft unterirdisch	Circa 37% der U-Bahn-Strecke verläuft unterirdisch	Circa 65% der U-Bahn-Strecke verläuft unterirdisch
Bildung, Forschung und Entwicklung	Entwicklungspotenzial Wissenschaftsstandort Frankfurt	Keine direkte Anbindung an den Campus, keine eigene Station mit entsprechender Bezeichnung, die den Wissenschaftsstandort FFM hervorhebt	Keine direkte Anbindung an den Campus, keine eigene Station mit entsprechender Bezeichnung, die den Wissenschaftsstandort FFM hervorhebt	Direkte Anbindung an den Campus mittels eigener Station "Campus Westend"
Beitrag Mobilitätswende	Verlagerte Fahrten vom MIV zum ÖPNV	11.500	11.500	11.800
	Induzierter Verkehr ÖPNV	4.400	4.400	5.200
	Mehrverkehr ÖPNV	15.900	15.900	17.000
	Einsparung bei Busleistungen	Entfall des Verstärkers L64 (Ginnheim – Miquel-/Adickesallee)	Entfall des Verstärkers L64 (Ginnheim – Miquel-/Adickesallee)	Entfall des Verstärkers L64 (Ginnheim – Miquel-/Adickesallee) Entfall der Linie L75 (Bockenh. Warte – Uni Campus Westend – Bockenh. Warte)

Hauptthema (Kriterium)	untergeordnetes Thema (Indikator)	Qualitative Bewertung (inkl. Ampelsystem)		
		Variante 1a	Variante 1d	Variante 3i
Baubedingte Eingriffe (bauzeitlich)	MIV-Flächen	Auswirkung auf MIV vermutlich sehr erheblich; aufwendige temporäre Verkehrsumlegungen erforderlich.	Auswirkung auf MIV vermutlich vorhanden; temporäre Verkehrsumlegungen in geringem Umfang erforderlich.	Auswirkung auf MIV vermutlich gering; temporäre Verkehrsumlegungen nur in sehr geringem Umfang erforderlich.
	Kampfmittelrisiko	Durch offene Bauweise in der Miquellallee und Zeppelinallee sowie auf der oberirdischen Strecke Risiko von anzutreffenden Kampfmitteln zu erwarten --> Risiko sehr hoch.	Im Bereich der Startbaugrube (Zeppelinallee/ Botanischer Garten), am Notausstieg sowie auf der oberirdischen Strecke Risiko von anzutreffenden Kampfmitteln zu erwarten --> Risiko mittel bis hoch.	Im Bereich der Startbaugrube (Miguelanlage) sowie an den Baugruben für die Notausstiege Risiko von anzutreffenden Kampfmitteln zu erwarten --> Risiko gering.
	Rettenweg / Andienung	Durch offene Bauweise in der Miquellallee und Zeppelinallee sowie zur Herstellung der oberirdischen Strecke sind erhebliche Einschränkungen in der Andienung zu erwarten --> Auswirkungen sehr hoch.	Im Bereich der Startbaugrube (Zeppelinallee/ Botanischer Garten), des Notausstiegs sowie zur Herstellung der oberirdischen Strecke sind Einschränkungen in der Andienung zu erwarten --> Auswirkungen mittel bis hoch.	Im Bereich der Startbaugrube (Miguelanlage) sowie an den Notausstiegen sind Einschränkungen in der Andienung zu erwarten --> kaum Auswirkungen.
Baubedingte Eingriffe (dauerhaft)	Naturschutz und Biodiversität	Beeinträchtigt durch ihre oberirdische Führung im Bereich Botanischer Garten und Grüneburgpark sowie innerhalb des Parks an der Bundesbank (Miguelanlage) erheblich die Funktionsfähigkeit der Parkanlagen und deren ökologische Funktion. Der geschützte Baumbestand entlang der Miquellallee (gesetzlich geschützter Biotop Typ Allee) würde für die offene Bauweise komplett oder einseitig gefällt werden.	Beeinträchtigt durch ihre oberirdische Führung im Bereich Botanischer Garten und Grüneburgpark sowie innerhalb des Parks an der Bundesbank (Miguelanlage) erheblich die Funktionsfähigkeit der Parkanlagen und deren ökologische Funktion.	Verläuft in den sensiblen Bereichen (Palmengarten, Botanischer Garten, Grüneburgpark und Park an der Bundesbank) komplett unterirdisch. Keine Flächenverluste der Varianten 1a&d. Der Bau der Station Campus Westend würde in einem Bereich stattfinden, der lediglich mit jungen Bäumen bestanden ist (einziger Risikobaum: alte Eiche vor den Rechtswissenschaften).
	Altlasten	Durchquert südlich der Station Bundesbank keine Altstandorte oder Altablagerungen.	Durchquert südlich der Station Bundesbank keine Altstandorte oder Altablagerungen.	Führt durch den Bereich der Goethe-Universität (ehemalige US-Liegenschaft; US Headquarter von 1945 bis 1995); im südlichen Bereich war das IG-Farbenhochhaus ansässig. Die Fläche wird derzeit (Stand: 23.01.2024) im Altflächeninformationssystem des Landes Hessen unter der ALTIS-Nr. 410.000.050-001.006 mit dem Status „altlastenverdächtige Fläche“ geführt.
Bauweise	-	Der Bau des Tunnels erfolgt zu 0% in geschlossener Bauweise	Der Bau des Tunnels erfolgt zu mehr als 50% in geschlossener Bauweise	Der Bau des Tunnels erfolgt zu mehr als 90% in geschlossener Bauweise

A.4 Quantitative Bewertung der Nachhaltigkeitsmatrix

		Quantitative Bewertung (0-1-2-System inkl. Gewichtung)					
Hauptthema (Kriterium)	untergeordnetes Thema (Indikator)	Variante 1a	Variante 1d	Variante 3i	Qualitäts-gewichtung	Gewichtung Kriterium	Teilgewichtung Indikator
THG-Bilanz	-	0,94	2,00	0,51	28,3	6,9	6,90
Ressourcenverbrauch	Verbau	0,00	1,85	2,00		7,1	1,78
	Menge Baustoffe	0,61	2,00	1,30			
	Umbauter Raum (Aushub)	1,65	2,00	1,43			
	Flächenverbrauch	0,02	0,30	2,00			
Hydrogeologie und Grundwasser	Grundwasserentnahme	0,00	2,00	1,58		6,4	0,43
	Grundwasservorkommen	0,00	2,00	1,00			
	Strömungssituation	1,00	2,00	2,00			
	Barrierewirkung durch Bauwerke	0,00	2,00	2,00			
	Permanente Auswirkung Vegetation	0,00	2,00	2,00			
	Permanente Auswirkung Wurzelzone	2,00	2,00	2,00			
	Wasserhaltung Vegetation	1,00	2,00	1,00			
	Hydrochemische Beeinflussung Grundwasserqualität	0,00	1,00	1,00			
	Risiken Grundwasserverunreinigung	1,00	1,00	1,00			
	Grundwasserreinigung	2,00	2,00	1,00			
	Oberflächengewässer	0,00	1,00	2,00			
	Auswirkung Biotope und Naturschutzgebiete	2,00	2,00	2,00			
	Einfluss Wärmeeintrag Wasserhaushalt	2,00	2,00	2,00			
	Externe Grundwassernutzung	0,00	2,00	2,00			
Auswirkung auf Gebäude	1,00	2,00	2,00				
Baumbestand	Bäume und waldartige Bestand	0,73	0,75	2,00	7,9	1,98	
	Habitatbäume	0,10	0,00	2,00			
	Zu fallende Bäume	0,00	0,14	2,00			
	Akut gefährdete Bäume	0,00	0,37	2,00			

		Quantitative Bewertung (0-1-2-System inkl Gewichtung)					
Hauptthema (Kriterium)	untergeordnetes Thema (Indikator)	Variante 1a	Variante 1d	Variante 3i	Qualitäts-gewichtung	Gewichtung Kriterium	Teilgewichtung Indikator
Baukosten	-	2,00	1,98	1,27	14,9	5,3	5,30
Fördermittel	Förderfähigkeit	2,00	2,00	2,00		4,6	4,60
Lebenszykluskosten Bauwerk	-	1,00	1,00	1,00		5	5,00
Immissionen	Lärm und Erschütterung	0,00	1,00	2,00	16,7	5,9	5,90
Denkmalschutz	-	0,00	0,00	2,00		4,2	4,20
Sicherheit	-	0,00	0,00	2,00		6,6	6,60
Städtebauliche Potenziale und Erschließung	Barrierewirkung der Trasse	0,00	0,00	2,00	27,7	7,3	1,83
	Vernetzung Stadträume	0,00	0,00	2,00			1,83
	Anbindung / Verknüpfung mit anderer Verkehrsinfrastruktur (Linienbusse, Ringstraße)	1,00	2,00	2,00			1,83
	Erschließung / Einzugsbereiche der Stationen	0,00	0,00	2,00			1,83
Verdichtung Stadtraum	-	0,75	0,70	1,30		6,1	6,10
Bildung, Forschung und Entwicklung	Entwicklungspotenzial Wissenschaftsstandort Frankfurt	0,00	0,00	2,00		6,7	6,70
Beitrag Mobilitätswende	Verlagerte Fahrten vom MIV zum ÖPNV	1,90	1,90	2,00		7,6	1,90
	Induzierter Verkehr ÖPNV	1,38	1,38	2,00			1,90
	Mehrverkehr ÖPNV	1,74	1,74	2,00			1,90
	Einsparung bei Busleistungen	1,00	1,00	2,00			1,90
Baubedingte Eingriffe (bauzeitlich)	MIV-Flächen	0,00	0,00	1,00	12,5	6,7	1,12
	Kampfmittelrisiko	0,00	1,00	2,00			1,12
	Rettungsweg / Andienung	0,00	1,00	2,00			1,12
Baubedingte Eingriffe (dauerhaft)	Naturschutz und Biodiversität	0,00	0,00	2,00			1,68
	Altlasten	2,00	2,00	1,00			1,68
Bauweise	-	0,00	1,20	1,89			5,8

A.5 Gesamtergebnisse der Nachhaltigkeitsmatrix

Zur Berechnung des Gesamterfüllungsgrades wird folgende Gleichung herangezogen:

$$E = \frac{\sum p_{ind} * \frac{\alpha_{krit}}{n_{ind,krit}}}{2} * 100$$

Mit:

E = Gesamterfüllungsgrad in [%]

p_{ind} = Erreichte Punktzahl des Indikators

α_{krit} = Wichtung des Kriteriums in %

$n_{ind,krit}$ = Anzahl der Indikatoren je Kriterium.

Die Tabelle 2 zeigt die erreichten Gesamterfüllungsgrade je betrachteter Variante.

Tabelle 2: Zusammenstellung der ermittelten Gesamterfüllungsgrade

	Variante 1a	Variante 1d	Variante 3i
Gesamterfüllungsgrad	32 %	51 %	84 %

A.6 Literatur

- [U 1] Brundtland, G. (1987): Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. United Nations General Assembly document A/42/427.
- [U 2] Deutscher Bundestag (1998): Abschlussbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt - Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltigen zukunftsverträglichen Entwicklung“ <https://dserver.bundestag.de/btd/13/112/1311200.pdf>
- [U 3] Deutsche Gesellschaft Nachhaltiges Bauen (DGNB): <https://www.dgnb.de/de/zertifizierung/das-wichtigste-zur-dgnb-zertifizierung/ueber-das-dgnb-system>
- [U 4] Bau-Institut Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit (BiRN): <https://bau-irn.com/bnkibng-system/bnkibng-qng-kriteriensteckbriefe>
- [U 5] Bewertungssystem nachhaltiges Bauen des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BNB): <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/methodik-und-anwendung/>
- [U 6] Lemaitre, C. (2021): „Lasst uns einfach anfangen!“ In: Hauke, B. (Hrsg.): Nachhaltigkeit, Ressourcenschutz und Klimaschutz – konstruktive Lösungen für das Planen und Bauen. Aktueller Stand der Technik. Berlin: Ernst und Sohn.
- [U 7] HOCHBAHN (2022): Neubauprojekt U5 Hamburg, THG-Bilanzierung und Roadmap: <https://www.hochbahn.de/re-source/blob/33768/067e583a2d2751ec94412caaf785b070/u5-d-klima-summary-data.pdf>
- [U 8] Stadt Köln (2024): Politischer Variantenentscheid für die Kapazitätserweiterung auf der Ost-West-Achse: <https://ratsinformation.stadt-koeln.de/vo0050.asp?kvonr=120696>.
- [U 9] DB Infra Go AG: Fernbahntunnel Frankfurt, Nachhaltigkeit: <https://www.fernbahntunnel-frankfurt.de/nachhaltigkeit.html>
- [U 10] DER MAGISTRAT (2022): Vortrag des Magistrats an die Stadtverordnetenversammlung: https://www.stvv.frankfurt.de/download/M_84_2022.pdf
- [U 11] LPI Ingenieurgesellschaft mbH (2024): Kapazitätserweiterung Ost-West-Achse. Vergleich oberirdische – unterirdische Stadtbahnführung. Vergleichende Darstellung der THG-Bilanzprognose. Auftraggeber: Stadt Köln: <https://ratsinformation.stadt-koeln.de/getfile.asp?id=982907&type=do>