www.bauingenieur.de

Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

DOI 10.37544/0005-6650-2025-03-56

CO_2-Emissionen von Infrastrukturprojekten im Straßenbau

S. Görtz, E. K. Bardenhewer, T. Volkenhoff, T. K. D. Pham

ZUSAMMENFASSUNG An der der Fachhochschule Kiel wurden in den letzten Jahren CO_2-Bilanzierungen von Infrastrukturmaßnahmen durchgeführt. Während die Untersuchungsergebnisse an Brückenbauwerken bereits in [1, 2] veröffentlicht sind, wurden diese mit Unterstützung des Landesbetrieb Straßenbau und Verkehr Schleswig-Holstein durch CO_2-Untersuchungen zum Straßenbau und zur bauzeitlichen Verkehrsführung vervollständigt. Hiermit lassen sich die wesentlichen CO_2-Treiber von Straßenbauprojekten identifizieren und ein CO_2-optimierter Bauablauf beziehungsweise eine bauzeitliche Verkehrsführung festlegen.

STICHWÖRTER

CO_2-Bilanzierung, Brückenbauwerke, bauzeitliche Verkehrsführung

CO_2 balancing of infrastructure projects in road construction

ABSTRACT At the Institute of Civil Engineering at Kiel University of Applied Sciences, CO_2 balances of infrastructure projects have been carried out in recent years. While the results of the investigations regarding bridge structures have already been published in [1, 2], these were completed with the support of Landesbetrieb Straßenbau und Verkehr Schleswig-Holstein by CO_2 investigations into the road construction and the traffic routing during construction. This allows the key CO_2 drivers of road construction projects to be identified and a CO_2-optimized construction process and traffic routing during construction to be determined.

1 Hintergrund

Die Bundesregierung hat sich im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) dazu verpflichtet, die anthropogene Treibhausgasemission (THG) bis zum Jahr 2030 um 65 % im Vergleich zum Jahr 1990 zu mindern. Laut Angaben des Umweltbundesamts lag die THG-Emission 2023 im Verkehrssektor mit rund 13 Millionen Tonnen über der nach KSG zulässigen Emission [3] Damit ist der Verkehr der einzige Sektor, der sein Ziel deutlich verfehlt hat. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit, im Bereich Verkehr und Infrastruktur die Anstrengungen zu erhöhen, die CO_2-Emission zu reduzieren.

Trotz des bedeutenden Einflusses von Infrastrukturmaßnahmen auf den Klimawandel fehlen in der Praxis aktuelle Kenntnisse oder auch Berechnungsmethoden, um die CO_2-Emission für die Erstellung und die Unterhaltung der Infrastruktur zu ermitteln. Auch in der Fachliteratur sind nur wenige Untersuchungen dokumentiert [1, 2, 4-10], die sich zudem vielfach auf die Ingenieurbauwerke beschränken. Ohne die notwendigen Fachkenntnisse und Erfahrungswerte bestehen weder für Bauherrn / Betreiber noch für Planungsbüros oder Bauausführende Möglichkeiten, den CO_2-Ausstoß zu steuern oder zu reduzieren.

Der vorliegende Beitrag stellt die Ergebnisse einer Untersuchung vor, die in Zusammenarbeit zwischen der Fachhochschule Kiel und dem Landesbetrieb Straßenbau und Verkehr Schleswig-Holstein entstanden ist. In dieser Untersuchung wurden praxisrelevante, typische Szenarien für Neubau und Erneuerung von Straßen- und Brückenbauwerken definiert und für diese CO_2-Emissionen modellhaft berechnet. Die Berechnungsmethodik wurde größtenteils auf standardisierten Verfahren und Datenquellen (z. B. Emissionsfaktoren) aufgebaut. In Teilen wurden eigene Annahmen getroffen. Ziel war es, neben den bauwerksbedingten Emissionen auch die verkehrsbedingten Emissionen während der Bauphase mit zu betrachten. Durch die systematische Variation von Bau-, Strecken- und Verkehrsszenarien wurden insgesamt 3 500 Modellrechnungen durchgeführt. Im nachfolgenden Artikel werden die Methodik der Berechnungen vorgestellt, eine Auswahl der Modellrechnungen präsentiert und die Erkenntnisse der Szenarienuntersuchung abgeleitet.

2 Durchführung der CO_2-Berechnungen

2.1 CO_2-Emissionen der Bauwerke (Ingenieurbauwerk und Verkehrsanlage)

2.1.1 Allgemeines zur Vorgehensweise

Die Berechnungen zu den CO_2-Emissionen von Bauwerken erfolgt nach DIN EN ISO 14040 [11] und DIN EN ISO 14044 [12]; hierbei wird das Treibhauspotenzial (GWP) als Sachbilanz einer Ökobilanz ermittelt, im Folgenden vereinfacht als „CO_2-Berechnung“ bezeichnet. Die Ergebnisse wurden gemäß der Bewertungsmethodik der DIN EN 15978-1 [13] ausgewertet. Hierbei werden die zu betrachtenden Bauwerke wie bei einer Kostenbe-

Tabelle 1. Anhaltswerte für CO_2-Emissionen für Ingenieurbauwerke in der Herstellungsphase (Phase A) und über den kompletten Lebenszyklus (Phasen A bis D)
Table 1. Estimated CO_2 emissions for civil engineering structures in the product stage (stage A) and throughout the whole lifecycle (stages A to D)

Bauwerk	Spezifikation	Bezug	Emission je Bezugsgröße in $kgCO_2$	
			Herstellungsphase (Phase A)	Lebenszyklus (Phase A bis D)
Straßenbrücke	Länge L < 33 m	je m² Brückenfläche	15 000/L[m] + 650	16 500/L[m] + 700
	Länge L > 33 m	je m² Brückenfläche	1 100	1 200
Reiner Überbau Straßenbrücke		je m² Brückenfläche	540	600
Instandsetzung Straßenbrücke	Austausch Kappen	je m Länge Geländer	40	-
	Austausch Geländer	je m Länge Kappe	135	-
	Austausch Fahrbahnbelag	je m² Brückenfläche	20	-
Fuß- und Radwegbrücke	mit massivem Widerlager	je m² Brückenfläche	28 800/L[m] + 400	32 000/L[m] + 450
	sonst	je m² Brückenfläche	630	700
Stahlbeton-Winkelstützwände	bis 3,5 m Höhe	je m² Ansichtsfläche	165	180
	ab 4,0 m Höhe*	je m² Ansichtsfläche	235	260

*) Zwischenwerte interpoliert

rechnung nach den einzelnen Baustoffen beziehungsweise Bauprodukten (Beton, Betonstahl, Baustahl usw. mit jeweiliger Güte bzw. Zusammensetzung) aufgeschlüsselt und die Massen mit CO_2-Einheitswerten aus den zugehörigen Umweltproduktdeklarationen, die angeben, wie viel kg CO_2 für den jeweiligen Baustoff in der deklarierten Einheit aufgewendet wird, multipliziert.

2.1.2 CO_2-Emissionen aus den Ingenieurbauwerken

Im Zuge der durchgeführten Untersuchungen wurden CO_2-Bilanzierungen an 36 realen und 480 parametrisierten Brückenbauwerken sowie ergänzende Untersuchungen an Stützwänden herangezogen und die Ergebnisse mit in der Literatur dokumentierten CO_2-Berechnungen [4-10] abgeglichen. Ein Teil der Ergebnisse wurde bereits in [1, 2] veröffentlicht, so dass an dieser Stelle nur die für die folgenden Untersuchungen wesentlichen Punkte zusammengefasst werden:

- Aktuell werden für eine Straßenbrücke über den gesamten Lebenszyklus etwa 1,2 bis 1,4 tCO_2/m^2 Brückenfläche aufgewendet. Da vor allem die massiven Betonwiderlager für eine hohe CO_2-Emission verantwortlich sind, nimmt der CO_2-Ausstoß je m^2 Brückenfläche mit abnehmender Bauwerkslänge zu. Die Werte sind vergleichsweise unabhängig von der Bauweise (Stahlbeton bzw. Spannbeton, Stahl und Stahl-Beton-Verbund).
- Bei Fuß- und Radwegbrücken ergeben sich etwa 0,7 bis 1,5 $tCO2/m^2$ Brückenfläche über den gesamten Lebenszyklus, wobei die Streuungen wegen der größeren Anzahl an Variationsmöglichkeiten hinsichtlich der Konstruktion höher sind. Für (dauerhaft konstruierte) Holzbrücken oder auch massenmäßig optimierte Stahlbrücken lassen sich auch geringere Werte erzielen [2].
- Ergänzend wurden nachträglich zu den Untersuchungen in [1, 2] auch Stützwände untersucht. Hier lassen sich für Höhen bis circa 3,50 m Werte von circa 180 $kgCO_2/m^2$ und ab 4,0 m circa 260 $kgCO_2/m^2$ Ansichtsflächen angeben. Zwischenwerte können interpoliert werden.
- Bei allen Bauwerken fällt mit circa 90 % der wesentliche Teil des CO_2-Ausstoßes in der Phase A (Herstellung der Baustoffe bzw. des Bauwerks) an. Hauptverantwortlich hierfür ist die Herstellung der Baustoffe.

In **Tabelle 1** sind für verschiedene Typen von Ingenieurbauwerken Anhaltswerte für CO_2-Emissionen in der Herstellungsphase (Phase A) und für den kompletten Lebenszyklus (Phasen A bis D: Herstellung, Nutzung, Rückbau, Recyclingpotential) zusammengestellt. Dabei wurde von einer Lebensdauer von circa 100 Jahren ausgegangen.

2.1.3 CO_2-Emissionen aus der Straßenverkehrsanlage

Bei (Straßen-) Verkehrsanlagen ist der Straßenkörper für den weitaus größten Teil der Freisetzung von CO_2 verantwortlich. Ähnlich wie bei den Ingenieurbauwerken fällt der Hauptteil der CO_2-Emissionen bereits in der Herstellungsphase A an. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden für eine grundhafte Erneuerung die in **Tabelle 2** zusammengestellten Aufbauten bzw. resultierende CO_2-Emissionen angesetzt.

2.2 CO_2-Emission aus der bauzeitlichen Verkehrsführung

Die Ermittlung der CO_2-Emission aus der bauzeitlichen Verkehrsführung erfolgte nach dem aktuellen Entwurf der Richtlinien für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (RWS) [14] und ist in den folgenden Schritten 1 bis 6 zusammenfassend beschrieben:

1. Zuordnung Streckentyp

Dem betrachteten Streckenabschnitt wird in Abhängigkeit der Straßenkategorie (Autobahn, Landstraße, anbaufreie bzw. angebaute Hauptverkehrsstraße) ein Streckentyp zugewiesen. Die Zuweisung orientiert sich an den Regelquerschnitten der Richtlinien für die Anlage von Autobahnen, Landstraßen und Stadtstraßen (RAA [15], RAL [16], RASt [17]).

Tabelle 2. CO_2-Emissionen für den Straßenaufbau in den Phasen A, C und D (Herstellung, Entsorgung und Recycling)
Table 2. CO_2 emissions for the pavement in the stages A, C and D (product, disposal and recycling)

(A) CO_2-Werte [kg/m²] für die Grundhafte Erneuerung des Straßenbaus

Belastungsklasse	Anwendung	Aufbau gemäß RStO bzw. ZTV Asphalt StB	$kgCO_2/m^2$
Bk 100	Autobahn, Landstraße	4 cm Splittmastixasphalt	62 $kgCO_2$ je m² Straßenfläche
		8 cm Asphaltbinder	
		22 cm Asphalttragschicht	
		51 cm Frostschutzschicht	
Bk 3,2	angebaute Hauptverkehrsstraße	4 cm Splittmastixasphalt	46 $kgCO_2$ je m² Straßenfläche
		6 cm Asphaltbinder	
		12 cm Asphalttragschicht	
		53 cm Frostschutzschicht	

(B) CO_2-Werte [kg/m²] für die reine Erneuerung der Deckschicht

Belastungsklasse	Anwendung	Aufbau gemäß RStO bzw. ZTV Asphalt StB	$kgCO_2/m^2$
Bk 100, Bk 3,2	Autobahn, Landstraße, angebaute Hauptverkehrsstraße	4 cm Splittmastixasphalt	8 $kgCO_2$ je m² Straßenfläche
		Bitumenemulsion	

2. Verkehrsstärke auf dem Streckenabschnitt

Weiterer zentraler Parameter für die CO_2-Berechnung ist die Verkehrsstärke. Idealerweise liegen hierzu projektbezogene Verkehrszählungen beziehungsweise spezifische Verkehrsprognosen vor. Ansonsten kann auf Ergebnisse der Straßenverkehrszählung auf Bundesfernstraßen der BASt [18] oder auf länderseitig organisierte Zählungen an klassifizierten Straßen, wie zum Beispiel die Verkehrsmengenkarte von Schleswig-Holstein [19] zurückgegriffen werden. Für die Ermittlung der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV) muss anschließend in Schwerverkehr (SV) und Leichtverkehr (LV) differenziert werden und es müssen anhand geeigneter Ganglinien die stündlichen Verkehrsbelastungen ermittelt werden.

Sofern keine genaueren Verkehrszählungen vorliegen, können der RWS [14] zum Beispiel typische Tagesganglinien für außer- und innerörtliche Strecken entnommen werden, wobei in fünf Tagesgruppen (Montag, Dienstag – Donnerstag, Freitag, Samstag sowie Sonn- und Feiertag) unterschieden wird. Hierbei wird der Leicht- und Schwerverkehr jeweils spezifisch anhand örtlicher Gegebenheiten aufgeteilt.

3. Verkehrskapazität, Auslastungsgrad und Verkehrszustand der Strecke

Jeder Streckentyp aus Schritt 1 kann eine entsprechende Verkehrskapazität C_S aufnehmen. Diese hängt von der Längsneigung, der Kurvigkeit und vor allem von der Verkehrszusammensetzung, speziell vom Schwerverkehrsanteil, die jeweils zeitlich veränderlich ist, ab. Durch Abgleich der Verkehrskapazität C_S mit der Verkehrsstärke q_{Kfz} aus Schritt 2 lässt sich der Auslastungsgrad x_S der Strecke gemäß RWS [14] nach Gleichung (1) bestimmen.

$$x_S = q_{Kfz}/C_S \qquad (1)$$

mit: x_S Auslastungsgrad der Strecke zu jeweiliger Stunde
q_{Kfz} Verkehrsstärke des Kfz-Verkehrs zu jeweiliger Stunde in [Kfz/h]
C_S streckenspezifische Verkehrskapazität in jeweiliger Stunde in [Kfz/h]

In Abhängigkeit des Auslastungsgrades werden gemäß RWS [14] sechs Verkehrszustandsstufen (VZS) definiert, angefangen vom „frei fließenden Verkehr“ im VZS 1 bis hin zum „starken Stop+Go-Verkehr“ im VZS 6 (**Tabelle 3**).

Grundsätzlich sind die Verkehrskapazitäten für den Regelbetrieb ermittelt worden. Der Einfluss zusätzlicher Verkehrsbeeinträchtigungen infolge bauzeitlicher Verkehrsführung auf die Kapazität lässt sich nach [20] mit den entsprechenden Reduktionsfaktoren, die in **Tabelle 4** dargestellt sind, vereinfacht modellieren.

Die Vorgehensweise ist nachfolgend an einem Beispiel dargestellt: Hier wurde ein Autobahnquerschnitt mit dreistreifiger Richtungsfahrbahn ausgewählt, bei dem der Verkehr bauzeitlich auf eine 4+0-Verkehrsführung umgeleitet wird. Als Verkehrsstärke wurde von 50 000 Kfz/24h je Fahrtrichtung (bzw. 100 000 Kfz/24h im Gesamtquerschnitt) mit einem SV-Anteil von 20 % ausgegangen, die Verkehrsstärke erreicht in den morgendlichen und abendlichen Spitzenstunden circa 3 500 Kfz/h je Fahrtrichtung.

Im Regelbetrieb weist der Querschnitt unter Berücksichtigung des SV-Anteils eine Grundkapazität von 5 300 Kfz/h je Fahrtrichtung auf. Diese reduziert sich für den eingeschränkten Querschnitt der 4+0-Verkehrsführung auf eine Grundkapazität von 3 700 Kfz/h. Zur Berücksichtigung der Einflüsse des Einzugs eines Fahrstreifens vor der Arbeitsstelle, die Überleitung auf die Gegenfahrbahn im Zuge der bauzeitlichen 4+0-Verkehrsführung und der reduzierten Fahrstreifenbreite ist diese nach Tabelle 4 nochmals auf (0,967 x 0,95 x 0,90) · 3 700 = 3 059 zu reduzieren.

Durch Abgleich der Verkehrsstärken mit der Streckenkapazität lässt sich mit Gleichung (1) der Auslastungsgrad und nach Tabelle 3 die Verkehrszustandsstufe ermitteln. **Bild 1** zeigt diese farblich für das oben genannte Beispiel, einmal für den Regelbetrieb

Tabelle 3. Verkehrszustandsstufen in Abhängigkeit des Auslastungsgrades gemäß RWS [14]
Table 3. Traffic condition levels based on the degree of capacity utilization according to the RWS [14]

Verkehrszustandsstufe (VZS)	Auslastungsgrad x_S [-] für Kategoriengruppe				
	Autobahnen	Landstraßen		anbaufreie Hauptverkehrsstraßen	angebaute Hauptverkehrsstraßen
		zweibahnig	einbahnig		
VZS 1 (freier Verkehr)	≤ 0,55	≤ 0,55	≤ 0,40	≤ 0,40	≤ 0,40
VZS 2 (überwiegend freier Verkehr)	≤ 0,90	≤ 0,90	≤ 0,80	≤ 0,80	≤ 0,80
VZS 3 (dichter Verkehr)	≤ 1,00	≤ 1,00	≤ 1,00	≤ 1,00	≤ 1,00
VZS 4 (Verkehr an der Kapazitätsgrenze)	≤ 1,15	≤ 1,15	≤ 1,05	≤ 1,05	≤ 1,05
VZS 5 (Stop+Go-Verkehr)	≤ 1,30	≤ 1,30	≤ 1,15	≤ 1,15	≤ 1,15
VZS 6 (Starker Stop+Go-Verkehr)	> 1,30	> 1,30	> 1,15	> 1,15	> 1,15

Tabelle 4. Faktoren zur Abminderung der Verkehrskapazität des Straßenquerschnittes bei bauzeitlicher Verkehrsbeeinträchtigung nach Volkenhoff [20]
Table 4. Factors for reducing road traffic capacity during construction-related traffic disruptions according to Volkenhoff [20]

Situation	Minderungsfaktor
Reduzierung von 3 auf 2 Fahrstreifen vor der Arbeitsstelle	0,967
Reduzierung von 2 auf 1 Fahrstreifen vor der Arbeitsstelle	0,975
Überleitung auf die Gegenfahrbahn	0,95
Reduzierte Fahrstreifenbreite	0,90
Wechselbetrieb durch Lichtsignalanlage	0,35 - 0,45

mit einer 3+3-Verkehrsführung ohne bauzeitliche Einschränkung (links) und einmal für die 4+0-Verkehrsführung (rechts). Es wird ersichtlich, dass sich die Verkehrszustände im Rahmen der bauzeitlichen Einschränkungen deutlich verschlechtern. Im regulären Betrieb liegt mit den VZS 1 und VZS 2 ausschließlich ein (überwiegend) freier Verkehrsfluss vor. Im Gegensatz hierzu sind im Rahmen der 4+0-Verkehrsführung insbesondere in den Spitzenstunden von Montag bis Freitag Streckenüberlastungen festzustellen, die auf die Fahrstreifenreduktion und die damit einhergehende Kapazitätseinschränkung zurückzuführen sind. Eine Überlastung liegt ab der VZS 4 vor. Darüber hinaus werden in einigen Stunden die VZS 5 und VZS 6 erreicht, die mit starken Stauerscheinungen verbunden sind.

4. Fahrleistung auf der Teilstrecke

Mit der Verkehrsstärke und –zusammensetzung kann mit Gleichung (2) der Anteil der Fahrleistung bei einer bestimmten VZS im betrachteten Streckenabschnitt ermittelt werden:

$$p_{FL,FzG,S,VZS} = FL_{FzG,S,VZS}/FL_{FzG,S} \qquad (2)$$

mit: $p_{FL,FzG,S,VZS}$ Fahrleistungsanteil bei einer bestimmten VZS an der gesamten Fahrleistung der Fahrzeuggruppe (FzG) auf einer Strecke (S)

$FL_{FzG,S,VZS}$ Fahrleistung einer Fahrzeuggruppe mit einer bestimmten VZS auf einer Strecke (S) [(Kfz*km)/Wo]

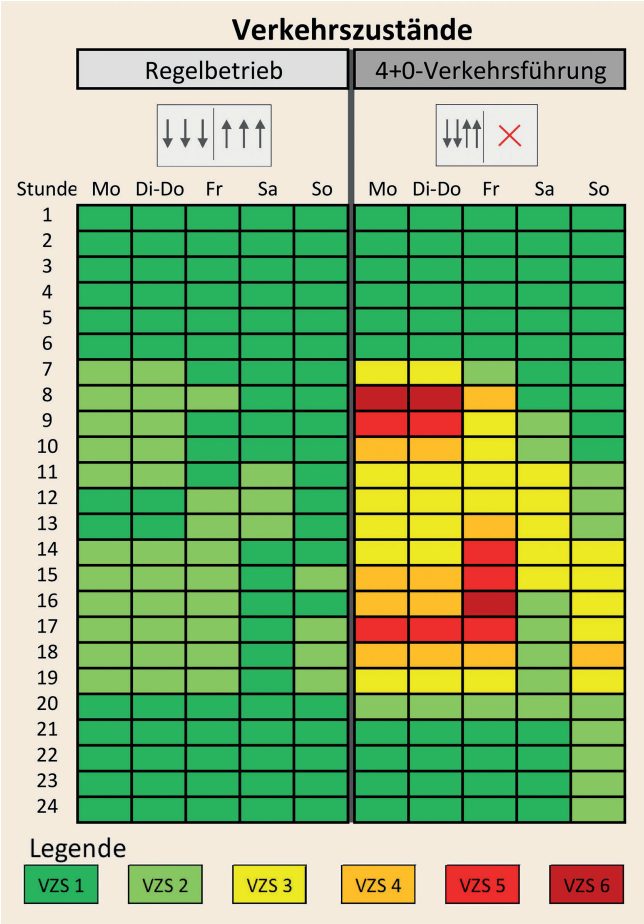

Bild 1. Verkehrszustände am Beispiel eines sechsstreifigen Autobahnquerschnittes mit bauzeitlicher 4+0-Verkehrsführung *Grafik: Bardenhewer, Pham*
Fig. 1. Traffic conditions using the example of a six-lane motorway with 4+0 traffic routing during construction *Source: Bardenhewer, Pham*

$FL_{FzG,S}$ Gesamte Fahrleistung einer Fahrzeuggruppe [(Kfz*km)/Wo]

Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse für das oben genannte Beispiel für den Regelbetrieb und die 4+0-Verkehrsführung aus Schritt 3 jeweils für eine Fahrtrichtung.

5. Ermittlung von CO_2-Emissionen aus dem Verkehr

Tabelle 5. Fahrleistung am Beispiel eines sechsstreifigen Autobahnquerschnittes mit bauzeitlicher 4+0-Verkehrsführung für eine Woche
Table 5. Vehicle performance using the example of a six-lane motorway with 4+0 traffic routing during construction for one week

Verkehrszustand (VZS)	Regelbetrieb				4+0-Verkehrsführung			
	Leichtverkehr (LV)		Leichtverkehr (LV)		Leichtverkehr (LV)		Schwerverkehr (SV)	
	Fahrleistung	Fahrleistungsanteil	Fahrleistung	Fahrleistungsanteil	Fahrleistung	Fahrleistungsanteil	Fahrleistung	Fahrleistungsanteil
	[(Kfz*km)/Woche]	[-]	[(Kfz*km)/Woche]	[-]	[(Kfz*km)/Woche]	[-]	[(Kfz*km)/Woche]	[-]
VZS 1	103 931	0,394	32 122	0,487	37 212	0,141	15 600	0,236
VZS 2	160 069	0,606	33 878	0,513	35 101	0,133	7 667	0,116
VZS 3	0	0	0	0	87 683	0,332	21 426	0,325
VZS 4	0	0	0	0	52 469	0,199	11 592	0,176
VZS 5	0	0	0	0	33 762	0,128	6 659	0,101
VZS 6	0	0	0	0	17 773	0,067	3 056	0,046
Gesamte Fahrleistung	264 000		66 000		264 000		66 000	

Die CO_2-Emission hängt maßgeblich von der Geschwindigkeit und von dem in Schritt 3 ermittelten Verkehrszustand der Strecke ab. Bezüglich der Geschwindigkeit lässt sich nach [21] ein näherungsweiser u-förmiger Zusammenhang angeben. Demzufolge ist der CO_2-Ausstoß bei Geschwindigkeiten zwischen 50 und 90 km/h am geringsten. Höhere Fahrgeschwindigkeiten verursachen aufgrund der hohen Motorlast einen großen Kraftstoffverbrauch, wodurch die Emissionsmenge ebenfalls steigt. Ebenso führen allerdings auch Durchschnittsgeschwindigkeiten unter 50 km/h wieder zu einer höheren CO_2-Emission, da der Motor trotz geringer Fortbewegung läuft. Durch häufige Anfahr- und Bremsvorgänge im Zuge eines „Stop and Go"-Verkehrs wird dieser Effekt noch mal deutlich verstärkt, daher führt eine hohe Verkehrszustandsstufe zu einem größeren CO_2-Ausstoß.

Für die Berechnung der CO_2-Emission werden neben den in Schritt 1 bis 4 bestimmten Kenngrößen aggregierte Emissionsfaktoren benötigt. Diese Emissionsfaktoren, die ebenfalls der RWS [14] entnommen wurden, gehen auf die Werte des „Handbuchs für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs" (HBEFA) zurück [22]. Hierbei handelt es sich um eine umfangreiche Datenbank, die einerseits spezifische Werte zu den gängigsten Fahrzeugtypen, aber genauso aggregierte Werte für eine Fahrzeugart bzw. Verkehrssituation bereitstellt. In der RWS [14] sind die Emissionsfaktoren dann für verschiedene Streckentypen, Fahrzeuggruppen und Verkehrszustandsstufen aufbereitet worden. Beispielhaft sind die Emissionsfaktoren der RWS [14] für einen sechsstreifigen Autobahnquerschnitt in **Tabelle 6** dargestellt.

Die Emissionsfaktoren unterscheiden sich in Abhängigkeit des vorliegenden Verkehrszustands, weshalb die verkehrsbedingten CO_2-Emissionen zunächst getrennt für jede Verkehrszustandsstufe nach Gleichung (3) ermittelt werden. Der gesamte CO_2-Ausstoß auf einer Strecke ergibt sich anschließend aus der Summe der einzelnen Fahrzeuggruppen.

$$CB_{S,FzG,VZS} = p_{FL,FzG,S,VZS} \cdot FL_{FzG,S} \cdot f_{FzG,VZS,CO2} \cdot 10^{-6} \qquad (3)$$

mit: $CB_{S,FzG,VZS}$ CO_2-Emissionen einer Fahrzeuggruppe (FzG) auf einer Strecke (S) mit einer bestimmten VZS [t CO_2/Woche]

$p_{FL,FzG,S,VZS}$ Fahrleistungsanteil einer Fahrzeuggruppe mit einer bestimmten VZS an der gesamten Fahrleistung auf einer Strecke [-]

$FL_{FzG,S}$ Gesamte Fahrleistung einer Fahrzeuggruppe [(Kfz·km)/Wo]

$f_{FzG,VZS,CO2}$ spezifischer Emissionsfaktor für CO_2 einer Fahrzeuggruppe für eine bestimmte VZS [g/(Kfz*km)]

6. Ermittlung des CO_2-Ausstoßes infolge der bauzeitlichen Verkehrsbeeinträchtigung

Mit der in Schritt 5 beschriebenen Vorgehensweise werden dann die CO_2-Emissionen für den Regelbetrieb und für die bauzeitliche Verkehrssituation bestimmt (Tabelle 6). Die CO_2-Emission infolge der Verkehrsbeeinträchtigung ergibt sich anschließend aus der Differenzbildung zum Regelbetrieb.

Für das oben genannte Beispiel werden die CO_2-Emissionen je Fahrtrichtung nach Tabelle 6 zu 66,6 tCO_2/Woche für den Regelbetrieb (3+3-Verkehrsführung) und 79,4 tCO_2/Woche für die bauzeitliche Verkehrsführung ermittelt. Aus der baubedingten Fahrstreifenreduktion des oben genannten Beispiels resultieren somit Mehremissionen von circa 79,4 – 66,6 = 12,8 tCO_2 pro Woche und Fahrtrichtung. Ursächlich hierfür ist die Verschlechterung des Verkehrsflusses beziehungsweise der erhöhten Fahrleistungsanteile in den höheren VZS infolge der 4+0-Verkehrsführung, die dann zu einer geringeren Geschwindigkeit und damit zu höheren Emissionsfaktoren (Tabelle 6) beziehungsweise zu einem höheren CO_2-Ausstoß führen.

3 Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen

3.1 Untersuchungsumfang

Die in Abschnitt 2 dargestellte Vorgehensweise wurde auf verschiedene typische Baustellensituationen angewendet. Dazu wur-

Tabelle 6. CO_2-Emissionen am Beispiel eines sechsstreifigen Autobahnquerschnittes mit bauzeitlicher 4+0-Verkehrsführung
Table 6. CO_2 emissions using the example of a six-lane motorway with 4+0 traffic routing during construction

	Emissionsfaktor		CO_2-Emissionen beim Regelbetrieb		CO_2-Emissionen bei der 4+0-Verkehrsführung	
	[g/(Kfz*km)]		[t CO_2/Wo]		[t CO_2/Wo]	
Verkehrszustand (VZS)	Leichtverkehr (LV)	Schwerverkehr (SV)	Leichtverkehr (LV)	Schwerverkehr (SV)	Leichtverkehr (LV)	Schwerverkehr (SV)
VZS 1	110,73	562,52	11,51	18,07	4,12	8,78
VZS 2	109,45	574,70	17,52	19,47	3,84	4,41
VZS 3	111,29	590,79	0,00	0,00	9,76	12,66
VZS 4	120,58	663,97	0,00	0,00	6,33	7,70
VZS 5	185,57	1 176,25	0,00	0,00	6,27	7,83
VZS 6	204,13	1 322,62	0,00	0,00	3,63	4,04
Zwischensumme			29,03	37,54	33,95	45,42
Gesamte CO_2-Emissionen			**66,57**		**79,37**	

Tabelle 7. Betrachtete Szenarien an Baumaßnahmen
Table 7. Considered scenarios for construction measures

Nr.	Baumaßnahme	Varianten Straßenquerschnitte	Bauzeitliche Verkehrsführung	Bauzeit
(1)	Neubau (bzw. Ersatzneubau) einer Straßenbrücke mit einer Überbaubreite zwischen 12,10 m und 37 m	6-streifiger Autobahnquerschnitt, RQ 36	4+0-VF	18 (22)* Monate
		4-streifiger Autobahnquerschnitt, RQ 31	4+0-VF / 2+0-VF / Umleitung über 2-streifige Landstraße	15 (20)* Monate
		2-streifige Landstraße, RQ 11	Umleitung über 2-streifige Landstraße bzw. angebaute Hauptverkehrsstraße	12 (13)* Monate
		4-streifige anbaufreie Hauptverkehrsstraße RQ 31	2+0-VF	15 Monate
(2)	Brückeninstandsetzung: Austausch der Kappen, der Geländer sowie des Fahrbahnbelags	6-streifiger Autobahnquerschnitt RQ 36	Wie Nr. (1), bei 2-streifigen Landstraßen außerdem Lichtsignalanlagen	4 Monate
		4-streifiger Autobahnquerschnitt RQ 31		3 Monate
		2-streifige Landstraße RQ 11		2 Monate
		4-streifige anbaufreie Hauptverkehrsstraße RQ 31		3 Monate
(3)	Grundhafte Erneuerung einer Fahrbahn	Wie Nr. (2)	Wie Nr. (1)	4 - 5 Monate
(4)	Deckenerneuerung einer Fahrbahn	Wie Nr. (2)	Wie Nr. (1)	4 - 5 Wochen

* Wert in ( ) für Ersatzneubau

den zunächst verschiedene Baumaßnahmen beziehungsweise Straßenquerschnitte definiert und hierfür sinnvolle bauzeitliche Verkehrsführungen festgelegt und die Bauzeit aus Erfahrungswerten abgeschätzt (**Tabelle** 7). Die Zusammenstellung der Szenarien deckt einen Großteil der Standardfälle im außerörtlichen Straßennetz ab.

Für jedes dieser Bau-, Strecken- und Verkehrsführungsszenarien wurde eine Berechnung der CO_2-Emissionen nach der vorgestellten Methodik vorgenommen. Da für die verkehrsbedingten Emissionen die Verkehrsbelastung in Form der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV) die maßgebende Einflussgröße ist, wurde diese für jedes Szenario in mehreren Stufen variiert. Die Spannbreite der Variation richtete sich dabei nach dem empfohlenen Einsatzbereich des Regelquerschnitts.

Durch die systematische Variation der Szenarien beziehungsweise der Verkehrsstärken wurden insgesamt circa 3 500 Berechnungen durchgeführt. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse auszugsweise dargestellt. Dabei wird der Fokus auf zwei Auswertungsinhalte gelegt: Zum einen werden die unterschiedlichen Möglichkeiten der bauzeitlichen Verkehrsführung verglichen, zum anderen werden die verkehrsbedingten Emissionen den bauwerksbedingten Emissionen gegenübergestellt. Die beobachteten Zusammenhänge werden jeweils an ausgewählten Szenarien illustriert, die abgeleiteten Erkenntnisse lassen sich aber qualitativ auch auf die weiteren durchgeführten Berechnungen übertragen.

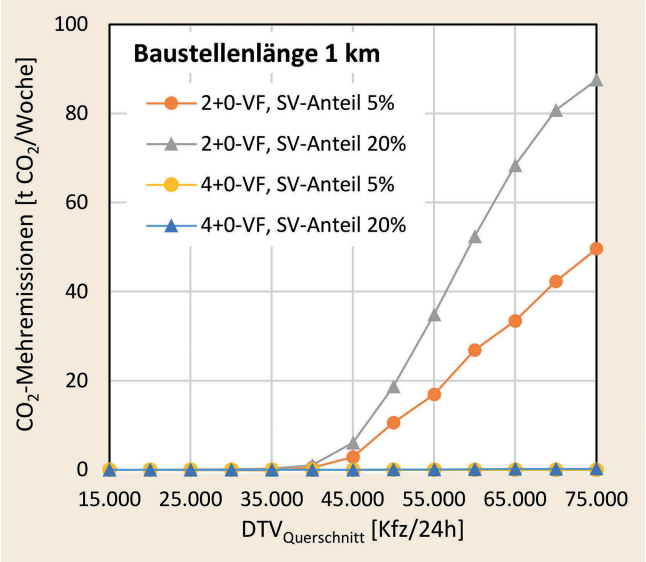

Bild 2. CO_2-Mehremissionen pro Woche eines 4-streifigen Autobahnquerschnitts bei steigender Verkehrsbelastung und einer Baustellenlänge von 1 km *Grafik: Bardenhewer, Pham*
Fig. 2. Additional CO_2 emissions per week of a 4-lane motorway with increasing traffic load and a construction site length of 1 km
Source: Bardenhewer, Pham

3.2 Vergleich unterschiedlicher Verkehrsführungen

3.2.1 Einschränkung des Verkehrs bei Aufrechterhaltung aller Fahrstreifen im Vergleich zum Einzug von Fahrstreifen

Es wird zunächst am Beispiel einer vierstreifigen Autobahn der Fall dargestellt, dass eine Fahrtrichtung bauzeitlich eingezogen und der Verkehr vollständig über die andere Richtungsfahrbahn geführt wird. Hierbei werden vergleichsweise die Situationen betrachtet, dass in einem Fall durch eine 4+0-Verkehrsführung alle Fahrstreifen mit verminderter Breite aufrechterhalten werden können und im anderen Fall wegen zu geringer Fahrbahnbreite zwei Fahrstreifen auf eine 2+0-Verkehrsführung eingezogen werden müssen. Für die Berechnung wurde jeweils von einer Baustellenlänge von 1 km ausgegangen, die Verkehrsstärke als Hauptparameter variiert und der Schwerverkehrsanteil zu 5 % beziehungsweise 20 % angenommen. Die hieraus ermittelten CO_2-Mehremissionen sind in **Bild 2** dargestellt.

Positiv fällt hierbei die bauzeitliche 4+0-Verkehrsführung unter Aufrechterhaltung der Fahrstreifenanzahl auf, hier lässt sich die CO_2-Mehremission auf deutlich unter 1 tCO_2 pro Kilometer und Woche eingrenzen, das sind etwa 1 % bezogen auf die CO_2-Emission des Regelbetriebs. Aufgrund der bauzeitlichen 4+0-Verkehrsführung verdichtet sich der Verkehr und die Fahrgeschwindigkeit liegt in dem optimalen Bereich unter 90 km/h, so dass die negativen Einflüsse infolge Überleitung, reduzierter Fahrstreifenbreite und erhöhter Verkehrsdichte nahezu kompensiert werden.

Anders verhält es sich bei der 2+0-Verkehrsführung mit Einzug von zwei Fahrstreifen (Bild 2). Die Streckenkapazität beträgt aufgrund einer Fahrstreifenreduktion sowie Fahrbahnüberleitung lediglich 42 % des Regelbetriebs. Dadurch entstehen bei steigendem Verkehrsaufkommen – zunächst nur in den Spitzenstunden – Überlastungen und der Verkehrsfluss verschlechtert sich. Im Resultat kommt es infolge häufiger Brems- und Beschleunigungsvorgänge zu Geschwindigkeitsschwankungen und die CO_2-Emissionen nehmen ab einer Querschnittsbelastung von 45 000 Kfz/24 h überproportional zu.

Die Erkenntnis, dass die CO_2-Emission bei Einzug einer Fahrspur ab einer gewissen Verkehrsstärke überproportional zunimmt, lässt sich auf andere Straßenquerschnitte übertragen. Bei einem 6-streifigen Autobahnquerschnitt mit bauzeitlicher 4+0-Verkehrsführung war dieses bei etwa 80 000 Kfz/24 h feststellbar und bei einem innerörtlichen vierstreifigen Straßenquerschnitt mit bauzeitlicher 2+0-Verkehrsführung ab etwa 25 000 Kfz/24 h.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass der Anstieg der CO_2-Emissionen vorrangig auf die Überlastung der Strecke zurückzuführen ist und dass es daher immens wichtig ist, alle Fahrstreifen bauzeitlich aufrechtzuerhalten. Anderenfalls treten bereits bei mittleren Verkehrsstärken hohe bauzeitliche CO_2-Mehremissionen auf.

3.2.2 Aufrechterhaltung der Fahrstreifen durch Einsatz einer Behelfsbrücke

Die vorangegangenen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Aufrechterhaltung aller Fahrstreifen im Hinblick auf die CO_2-Bilanz die zu bevorzugende Lösung ist. Da im Bestand allerdings vielfach keine ausreichende Querschnittsbreite zur Verfügung steht, wird im Folgenden die Variante untersucht, die zu sperrende Fahrtrichtung durch eine Behelfsbrücke aufrechtzuerhalten. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass auch die Behelfsbrücke zunächst errichtet werden muss, was sowohl Kosten als auch CO_2-Emissionen verursacht. Diese CO_2-Emissionen für die Errichtung der Behelfsbrücken wurden mit den Werten aus [2] wie folgt abgeschätzt:

- In [2] wurde für überschlägige CO_2-Berechnungen von Brücken für Stahlbetonwiderlager ein CO_2-Kennwert von circa 2 t/m² Ansichtsfläche angegeben. Für die Unterbauten von Behelfsbrücken, die deutlich massenoptimierter ausgebildet werden, werden hiervon im Rahmen der vorliegenden Untersuchung 50 % in Ansatz gebracht.
- Weiterhin wurden in [2] für den Überbau einer neuen Brücke CO_2-Emissionen von circa 0,7 t/m² Brückenfläche angegeben. Da der Überbau für die Behelfsbrücke einerseits massenoptimierter ausgebildet ist und andererseits nicht neu erstellt werden muss, sondern diese vielfach verwendet wird, werden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung hiervon 10 %, also 0,07 t/m² Brückenfläche in Ansatz gebracht.

In **Bild 3** sind für eine 20-monatige Baumaßnahme an einem außerörtlichen vierstreifigen Straßenquerschnitt die Situation „Aufrechterhalten aller Fahrstreifen unter Einsatz einer Behelfsbrücke“ und das Szenario einer 2+0-Verkehrsführung vergleichend dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass für den Fall, dass durch die bauzeitliche Verkehrsbeeinträchtigung Überlastungen beziehungsweise Mehremissionen bei der 2+0-Verkehrsführung auftreten, diese durch die Behelfsbrücke signifikant reduziert werden. Der auf die Bauzeit umgelegte CO_2-Anteil für die Errichtung der Behelfsbrücke würde bei kürzerer Bauzeit zwar antiproportional steigen, jedoch würde sich auch hier bei entsprechender Verkehrsstärke schnell ein positiver Effekt einstellen.

Zusammenfassend ergibt sich auch hier, dass die geringsten CO_2-Emissionen entstehen, wenn alle Fahrstreifen aufrechterhalten werden können.

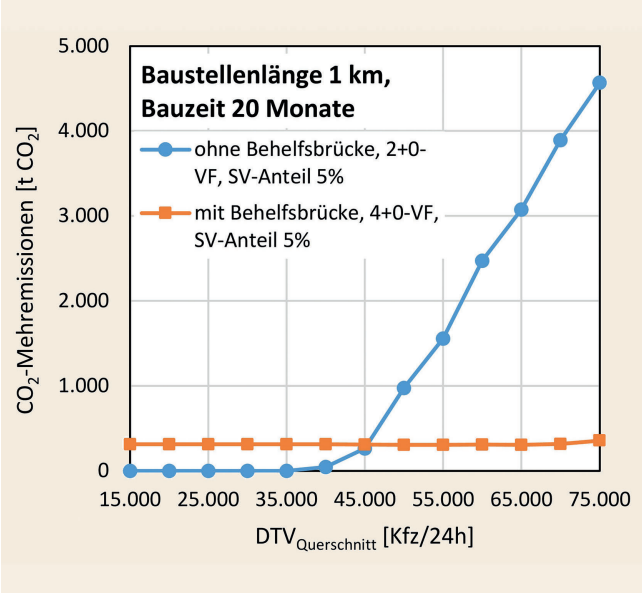

Bild 3. CO_2-Mehremissionen eines 4-streifigen Autobahnquerschnitts bei steigender Verkehrsbelastung, einem Schwerverkehrsanteil von 5 % sowie einer Baustellenlänge von 1 km für unterschiedliche Verkehrsbelastungen im Zuge eines Brückenersatzneubaus bei 20 Monaten Bauzeit
Grafik: Bardenhewer, Pham
Fig. 3. Additional CO_2 emissions of a 4-lane motorway with increasing traffic load, a share of heavy traffic of 5 %, and a construction site length of 1 km for varying traffic loads during a 20-month bridge replacement construction *Source: Bardenhewer, Pham*

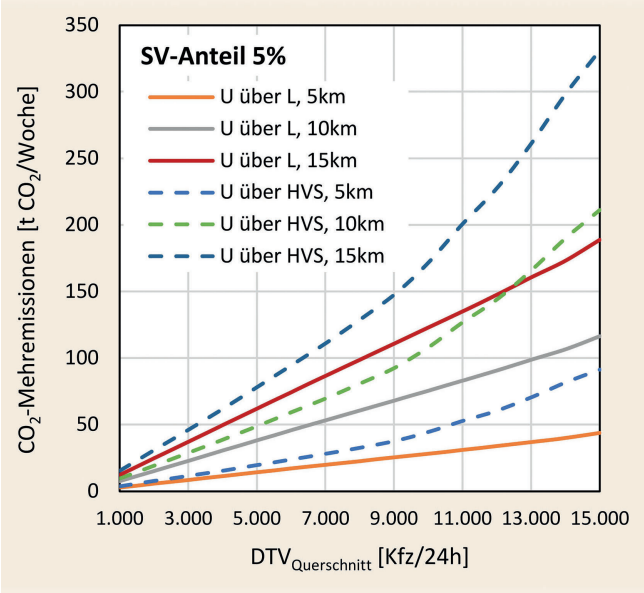

Bild 4. CO_2-Mehremissionen pro Woche aufgrund einer Vollsperrung eines 2-streifigen Straßenquerschnitts bei steigender Verkehrsbelastung und einem Schwerverkehrsanteil von 5 % *Grafik: Bardenhewer, Pham*
Fig. 4. Additional CO_2 emissions per week of a 2-lane road with increasing traffic load due to a full closure and a share of heavy traffic of 5 %
Source: Bardenhewer, Pham

3.2.3 Vollsperrung und Umleitung des Verkehrs

Gerade bei Landstraßen ist bei Baumaßnahmen aufgrund fehlender Straßenbreite eine Aufrechterhaltung der Verkehrsbeziehungen oft nur schwierig möglich, so dass hier oft eine Vollsperrung in Verbindung mit einer Verkehrsumleitung eingerichtet wird. Hierzu wurden im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen die Situationen betrachtet, dass der Verkehr einer zweistreifigen Landstraße (L) auf eine gleichrangige Landstraße sowie eine angebaute Hauptverkehrsstraße (HVS) umgeleitet wurde, wobei die Umleitungslängen (5 km, 10 km und 15 km) variiert wurden. Den dargestellten Umleitungsvarianten wurde eine Grundauslastung der Umleitungsstrecke von pauschal 40 % zugrunde gelegt.

Die in **Bild 4** dargestellten CO_2-Mehremissionen aus den verschiedenen Varianten zeigen im Abgleich mit den Werten bei Verkehrseinschränkung nach Bild 2 eindeutig, dass sich bei Umleitungen im Regelfall deutlich höhere CO_2-Mehremissionen ergeben. Dieses ist einerseits auf den längeren Fahrweg zurückzuführen, darüber hinaus führt der Mehrverkehr auf den Umleitungsstrecken allerdings auch zu höheren Auslastungsgraden und damit zu Mehremissionen. Die CO_2-Mehremission steigt hierbei etwa proportional zur Streckenlänge der Umleitung an.

Weiterhin wird im direkten Vergleich der betrachteten Varianten deutlich, dass der Umleitungsverkehr auf zweistreifigen Hauptverkehrsstraßen trotz gleicher Streckenlänge mehr CO_2 als auf zweistreifigen Landstraßen emittiert. Dies ist auf die unterschiedlichen Streckenkapazitäten zurückzuführen. Die Detailanalyse zeigt, dass bei der Umleitung über gleichrangige Landstraßen trotz der Berücksichtigung einer bestehenden Grundauslastung bei Verkehrsstärken bis 15 000 Kfz/24 h keine Überlastungen auftreten. Daher unterscheidet sich der CO_2-Ausstoß pro Kilometer in dieser bauzeitlichen Situation kaum gegenüber dem Regelbetrieb und der Emissionsanstieg ist ausschließlich auf die zusätzliche Weglänge zurückzuführen (s. linearer Anstieg). Die Umleitungen über angebaute Hauptverkehrsstraßen verfügen aufgrund veränderter Betriebsmerkmale (z. B. Liefer- und Ladevorgänge) hingegen nur über etwa 40 % der Kapazität des Regelbetriebs. Daher treten hier bereits ab circa 10 000 Kfz/24 h Streckenüberlastungen auf, was sich in Bild 4 am überproportionalen Anstieg der CO_2-Emissionen zeigt.

Zusammenfassend bestätigen die Untersuchungen, dass der Verkehr nur in Ausnahmefällen und dann immer auf Strecken mit möglichst hoher Kapazität umgeleitet werden sollte, um Überlastungen zu minimieren. Auch bei geringen Verkehrsstärken treten bereits erhebliche Mehremissionen durch Umwege auf.

3.3 Vergleich CO_2-Emission aus Erstellung Bauwerk und bauzeitlicher Verkehrsführung

3.3.1 Allgemeines

Im Folgenden wird die CO_2-Bilanz der Gesamtmaßnahme untersucht, um zu analysieren, ob der wesentliche CO_2-Treiber das Bauwerk (Ingenieurbauwerk und Verkehrsanlage) oder die bauzeitliche Verkehrsbeeinträchtigung ist. Dieser Schritt liefert einen wichtigen Ansatzpunkt für Optimierungen der Gesamtmaßnahme unter CO_2-Aspekten.

3.3.2 Brückenbauwerk

Wie in **Tabelle** 7 beschrieben, werden bezüglich des Brückenbauwerks die folgenden Varianten betrachtet:

1. Neubau (bzw. Ersatzneubau) einer Straßenbrücke mit einer Überbaubreite zwischen 12,10 (RQ 11B) und 37 m (RQ 36B)
2. Brückeninstandsetzung: Austausch der Kappen (inkl. Geländer) und des Fahrbahnbelags

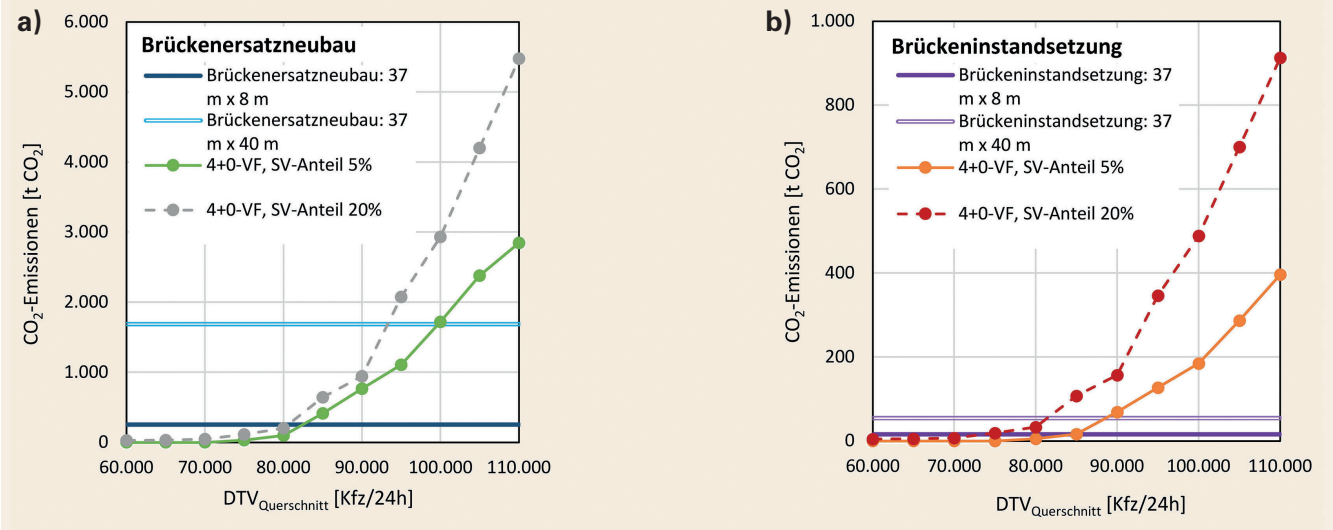

Bild 5. Abgleich CO_2-Emission infolge Bauwerkserstellung und Mehremission aus bauzeitlicher Verkehrsführung mit einer Länge von 1 km: links: Ersatzneubau Brückenbauwerk, rechts: Brückeninstandsetzung *Grafik: Bardenhewer, Pham*
Fig. 5. Comparison of CO_2 emissions from construction and additional emissions due to the associated temporary traffic routing with a length of 1 km: left: bridge replacement, right: bridge refurbishment *Source: Bardenhewer, Pham*

Hierbei werden die CO_2-Emissionen für die Bauwerkserstellung mit den Werten nach Tabelle 1 abgeschätzt. Der Ermittlung der CO_2-Emission aus der bauzeitlichen Verkehrsführung liegen die Bauzeiten nach Tabelle 7 zugrunde.

Im Folgenden sind exemplarisch die Ergebnisse für ein Brückenbauwerk einer sechsstreifigen Autobahn dargestellt, das den Verkehrsweg über ein Hindernis (ohne Verkehr unterhalb der Brücke) überführt. Als Bauwerkslängen wurden die Fälle 8 m und 40 m variiert. In **Bild 5** sind jeweils die CO_2-Emissionen aus der Bauwerkserstellung dem CO_2-Anteil aus der bauzeitlichen Verkehrsführung gegenübergestellt, wobei Verkehrsstärke und Schwerverkehrsanteil variiert wurden. Bezüglich der Länge der Verkehrsführung wurde von 1 km ausgegangen. Enthalten sind links die CO_2-Emissionen infolge eines Brückenersatzneubaus (18 Monate) sowie rechts infolge einer Brückeninstandsetzung (13 Wochen).

Es zeigt sich, dass der CO_2-Anteil aus bauzeitlichen Verkehrsbeeinträchtigungen die Bauwerksemissionen bei hohen Verkehrsstärken deutlich übersteigen kann. Sowohl im Rahmen des untersuchten Brückenersatzneubaus als auch der Instandsetzungsmaßnahme übertreffen die verkehrsbedingten CO_2-Emissionen den Anteil aus dem Bauwerk ab einer bestimmten Verkehrsstärke. Im Falle des Brückenersatzneubaus variieren die Bauwerksemissionen in Abhängigkeit von der Bauwerkslänge deutlich. Dementsprechend erreichen die verkehrsbedingten Emissionen die Bauwerksemissionen bei einer geringen Länge von 8 m bereits bei 80 000 Kfz/24 h, bei einer größeren Länge von 40 m allerdings erst im Bereich von 90 000 bis 100 000 Kfz/24 h. Weiterhin ist der bereits gezeigte Zusammenhang zu beobachten, dass der Schwerverkehrsanteil im Falle einer Streckenüberlastung einen hohen Einfluss auf die CO_2-Emision hat.

Der Fall der Brückeninstandsetzung zeigt ein ähnliches Bild für die verkehrsbedingten Emissionen, die Bauwerksemissionen sind allerdings deutlich niedriger. Hier ist der CO_2-Anteil aus der bauzeitlichen Verkehrsführung der zentrale CO_2-Treiber.

Das exemplarische Beispiel zeigt wie die weiteren berechneten Szenarien, dass das Handlungspotenzial für eine CO_2-Reduktion stark von der Art der Baumaßnahme und der anliegenden Verkehrssituation abhängt. Je nach Szenario sollten Optimierungsmaßnahmen eher beim Bauwerk oder eher bei der bauzeitlichen Verkehrsführung ansetzen.

3.3.3 Fahrbahnerneuerung

Wie in Tabelle 7 beschrieben, werden bezüglich der Fahrbahnerneuerung die beiden Varianten (3) Grundhafte Erneuerung einer Fahrbahn und (4) Deckenerneuerung der Fahrbahn betrachtet. Die CO_2-Emission für die Fahrbahnerneuerung wurde Tabelle 2 entnommen. Der Ermittlung der CO_2-Emission aus der bauzeitlichen Verkehrsführung liegen die Bauzeiten nach Tabelle 7 zugrunde. Auch hier sind die CO_2-Emissionen der Fahrbahnerneuerung wieder den Mehremissionen der bauzeitlichen Verkehrsführung gegenübergestellt, wobei die Verkehrsstärke und der Schwerverkehrsanteil variiert wurden.

Bild 6 zeigt exemplarisch die Emissionen bei einer grundhaften Fahrbahnerneuerung (links) und für eine reine Deckenerneuerung (rechts) eines sechsstreifigen Autobahnquerschnitts mit einer bauzeitlichen 4+0-Verkehrsführung. Die Länge der Arbeitsstelle wurde mit 1 km angenommen.

Bei dem Vergleich werden bei der grundhaften Erneuerung gegenüber der reinen Deckenerneuerung wegen den größeren Mengen an Baustoffen und der längeren Bauzeit naheliegenderweise höhere Emissionen verursacht, qualitativ sind die Verläufe aber vergleichbar. Obwohl von den sechs Fahrstreifen bauzeitlich nur vier aufrechterhalten werden, zeigen die Ergebnisse, dass der CO_2-Anteil aus der Ertüchtigung der Fahrbahn den Anteil aus der bauzeitlichen Verkehrsführung im Regelfall übersteigt. Dies ist in den vergleichsweise kurzen Bauzeiten für die Straßenbauarbeiten und der damit kurzen Phase der Verkehrsbeeinträchtigung begründet. Lediglich bei reiner Deckenerneuerung und zugleich hohen Verkehrsstärken mit hohem Schwerverkehrsanteil von 20 % dominiert die CO_2-Emission aus der bauzeitlichen Verkehrsführung. Diese Aussage lässt sich grundsätzlich auch auf die Ergebnisse anderer Straßenquerschnitte übertragen.

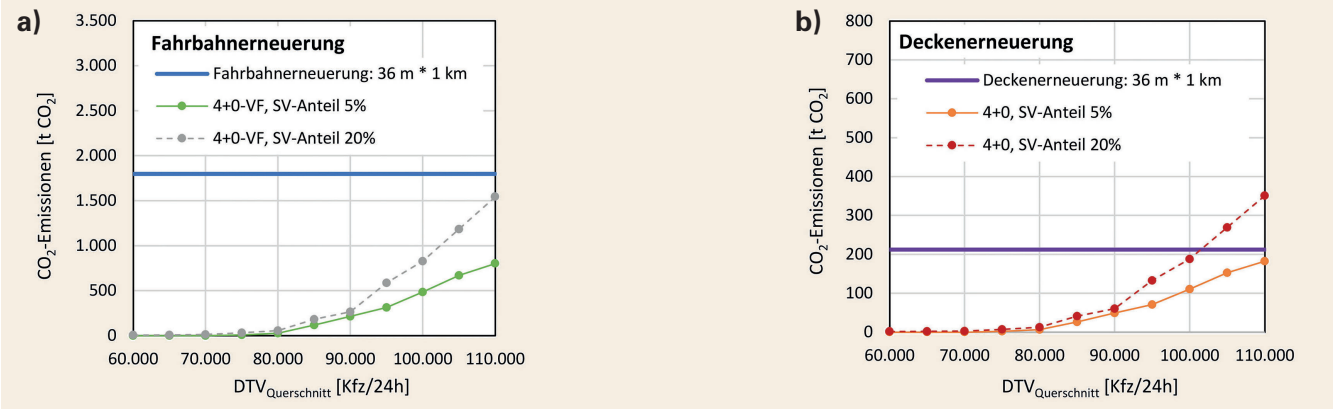

Bild 6. Abgleich CO_2-Emission aus Fahrbahnerneuerung und Mehremission aus zugehöriger bauzeitlicher Verkehrsführung bei sechsspurigem Autobahnquerschnitt und Länge der Arbeitsstelle von 1 km: links: Grundhafte Fahrbahnerneuerung, rechts: Deckenerneuerung *Grafik: Bardenhewer, Pham*
Fig. 6. Comparison of CO_2 emissions from road renewal and additional emissions due to the associated temporary traffic routing for a six-lane motorway and a work site length of 1 km: left: full-depth road reconstruction, right: surface renewal *Source: Bardenhewer, Pham*

4 Zusammenfassendes Fazit und Empfehlungen

An der Fachhochschule Kiel wurden in den letzten Jahren CO_2-Bilanzierungen von Infrastrukturmaßnahmen an Straßen durchgeführt. Während die Ergebnisse an den Untersuchungen an Brückenbauwerken bereits in [1, 2] veröffentlicht sind, wurden diese mit Unterstützung des Landesbetriebs Straßenbau und Verkehr Schleswig-Holstein durch CO_2-Untersuchungen zur Verkehrsanlage und zur bauzeitlichen Verkehrsführung vervollständigt. Hierzu wurde im vorliegenden Beitrag ein Berechnungsverfahren auf Basis des aktuellen Entwurfs der RWS [14] vorgestellt und hiermit parametrisierte Untersuchungen durchgeführt, um die wesentlichen CO_2-Treiber von Infrastrukturmaßnahmen zu identifizieren.

Aus den durchgeführten Untersuchungen lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Neben der Erstellung des Bauwerks resultieren bei Infrastrukturmaßnahmen an Straßen signifikante CO_2-Mehremissionen aus bauzeitlichen Verkehrsbeeinträchtigungen. Diese sind im Regelfall nicht vernachlässigbar und können die CO_2-Emission aus der Erstellung des Bauwerks übersteigen.
- Haupt-CO_2-Treiber bei bauzeitlichen Verkehrsbeeinträchtigungen sind zusätzliche Fahrwege infolge Umleitungsstrecken beziehungsweise Stausituationen. Eine Vollsperrung mit Umleitung des Verkehrs ist im Regelfall die Variante, die die höchsten CO_2-Emissionen nach sich zieht.
- Die geringsten CO_2-Mehremissionen ergeben sich, wenn bauzeitlich alle Fahrstreifen aufrechterhalten werden. Wenn die zur Verfügung stehende Nutzbreite nicht ausreichend ist, können hier Zusatzmaßnahmen wie eine Behelfsbrücke oder (bei kleineren Straßenquerschnitten) eine Lichtsignalanlage zielführend sein. Neue Streckenabschnitte sollten in jedem Fall mit einer ausreichenden Fahrbahnbreite gebaut werden, so dass bei Baumaßnahmen die Fahrbahn halbseitig gesperrt und alle Fahrstreifen über die nutzbare Hälfte geführt beziehungsweise auf die Gegenfahrbahn übergeleitet werden können.

Können bauzeitlich nicht alle Fahrstreifen aufrecht erhalten werden, sind signifikante Mehremissionen infolge von Verkehrsbeeinträchtigung zu erwarten. Hier sollte es die Zielsetzung sein, das Bauwerk im Hinblick auf einen schnellen Bauablauf beziehungsweise eine minimale bauzeitliche Verkehrsbeeinträchtigung zu optimieren. So kann beispielsweise mit einem möglichst hohen Grad an Vorfertigung gearbeitet werden, um die Bauteile dann in nächtlichen Sperrpausen einzuheben [1, 2, 23], wie es beispielsweise bei Bahnbrücken mit geringem zulässigen Sperrzeitfenster üblich ist. Wenn bei geringeren Verkehrsstärken der CO_2-Anteil aus der Erstellung des Bauwerks dominiert, ist es sinnvoll, dieses im Hinblick auf eine geringe CO_2-Emission zu optimieren. Hierzu sind zum Beispiel in [1, 2] zahlreiche Maßnahmen zusammengestellt. Zusammenfassend ist zu empfehlen, das CO_2-Reduktionspotenzial bereits in einem sehr frühen Planungsstadium einer Baumaßnahme zu untersuchen, um zielgerichtete Optimierungen mit größtmöglichem Wirkungsgrad abzuleiten.

Literatur

[1] *Görtz, S.; Pham, T.K.D.:* CO_2-Berechnungen von Brücken mit Bauwerkslängen bis 40 m. *In:* Bautechnik 101 (2024), Heft 2. doi.org/10.1002/bate.202300098.

[2] *Görtz, S.; Pham, T.K.D.:* CO_2-Bilanzierung und Optimierung von Brückenbauwerken. Gesellschaft für Energie & Klimaschutz Schleswig-Holstein, 2023, www.eksh.org/fileadmin/redakteure/downloads/foerderung/Abschlussberichte_HWT/8_12_52_Abschlussbericht_HWT_CO2-Bilanzierung-Br%C3%BCckenbauwerke_FHKiel.pdf.

[3] Umwelt Bundesamt: Klimaemissionen sinken 2023 um 10,1 Prozent – größter Rückgang seit 1990 – UBA-Projektion: Nationales Klimaziel bis 2030 erreichbar, 2024, www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/klimaemissionen-sinken-2023-um-101-prozent [Zugriff am: 20.01.2025].

[4] *Schmidt-Thrö, G.; Mielecke, T.; Jungwirth, J. et al. (Hrsg.):* Pilotstudie zum Bewertungsverfahren Nachhaltigkeit von Straßenbrücken im Lebenszyklus. Bundesanstalt für Straßenwesen; Wirtschaftsverlag N.W. Verlag für Neue Wissenschaft, Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen Brücken- und Ingenieurbau Heft B 131, Fachverlag NW, Bremen, 2016.

[5] *Zinke, T.:* Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauwerken. Ganzheitliche Bewertung von Autobahnbrücken unter besonderer Berücksichtigung externer Effekte, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2016.

[6] *Kuhlmann, U.; Maier, P.; Zinke, T. et al.:* Ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundbrücken nach Kriterien der Nachhaltigkeit. Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. Ausgabe 2016.

[7] *Kuhlmann, U.; Lenz, K.; Schneider, S. et al.:* Ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundeisenbahnbrücken nach Kriterien der Nachhaltigkeit. Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. Ausgabe 2019.

[8] *Mancke, R.; Gebert, G.:* Ökobilanzielle Bewertung von alternativen Bauweisen am Beispiel eines typischen Überführungsbauwerks im Zuge von Autobahnen. *In:* Bautechnik 99 (2022), Heft 7, S. 533-546. doi.org/10.1002/bate.202200051.

[9] *Müller, M.F.:* BIM-gestützte Nachhaltigkeitsbewertung bei Brückenbauwerken. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2024.

[10] *Hoppe, J.; Sanio, D.; Hormel, A. et al.:* CO_2-Bilanzierung bei Straßenbrücken – Ein Bewertungsansatz für die Planungsphase von Baumaßnahmen. *In:* Bauingenieur 99 (2024), Heft 11, S. 354-365. doi.org/10.37544/0005–6650–2024–11–40.

[11] DIN EN ISO 14040:2021–02: Umweltmanagement Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Ausgabe Februar 2021.

[12] DIN EN ISO 14044:2021–02: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. Ausgabe Februar 2021.

[13] DIN EN 15978–1:2021–09: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Methodik zur Bewertung der Qualität von Gebäuden Teil 1: Umweltqualität. Entwurf, Ausgabe September 2021.

[14] *Baier, M.M.:* Richtlinien für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (RWS), Entwurf, Aachen, 2019.

[15] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Autobahnen – RAA. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV R1 – Regelwerke Heft 202, FGSV-Verl., Köln, 2008.

[16] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Landstraßen RAL. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Heft 201, FGVS-Verl., Köln, 2013.

[17] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen – RASt 06. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Heft 200, FGSV-Verl., Köln, 2012.

[18] Bundesanstalt für Straßenwesen: Manuelle/Temporäre Straßenverkehrszählung (SVZ), www.bast.de/DE/Statistik/Verkehrsdaten/Manuelle-Zaehlung.html [Zugriff am: 20.01.2025].

[19] Landesbetrieb Straßenbau und Verkehr Schleswig-Holstein: Verkehrsmengenkarte 2015, 2018, https://www.schleswig-holstein.de/DE/landesregierung/ministerien-behoerden/LBVSH/Aufgaben/Strassenbau/Downloads/verkehrsmengenkarte2015.html [Zugriff am: 20.01.2025].

[20] *Volkenhoff, T.:* Modellbasierte Ableitung des Einsatzbereiches eines videogestützten Störfall- und Arbeitsstellenmanagements in Arbeitsstellen längerer Dauer auf Bundesautobahnen. Aachen: Institut für Straßenwesen, RWTH Aachen, 2014.

[21] *Matthew Barth; Kanok Boriboonsomsin:* Traffic Congestion and Grennhouse Gases, 2009, www.accessmagazine.org/wp-content/uploads/sites/7/2016/01/access35_Traffic_Congestion_and_Grenhouse_Gases.pdf [Zugriff am: 20.01.2025].

[22] Umwelt Bundesamt: Hintergrundinformationen zum Handbuch für Emissionsfaktoren für Straßenverkehr (HBEFA), 2017, www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/faqs_hbefa.pdf [Zugriff am: 20.01.2025].

[23] *Reddemann, T.:* Brückenschnellbau – Konzepte, Randbedingungen und Beispiele – Fachtagung „Brücken im Fokus 2022“ der Ingenieurakademie West Ausgabe 2022.

Prof. Dr.-Ing. Stephan Görtz

stephan.goertz@fh-kiel.de

Fachhochschule Kiel
Institut für Bauwesen
Moorblöcken 12, 24149 Kiel

Foto: A. Diekötter

Emma Karoline Bardenhewer, B.Eng.

Emma.Bardenhewer@lbv-sh.landsh.de

Prof. Dr.-Ing. Tobias Volkenhoff

Tobias.Volkenhoff@lbv-sh.landsh.de

Landesbetrieb Straßenbau und Verkehr
Schleswig-Holstein
Mercatorstr. 9, 24106 Kiel

Thi Kim Dung Pham, M.Sc.

kim-dung.pham@fh-kiel.de

Fachhochschule Kiel
Institut für Bauwesen
Moorblöcken 12, 24149 Kiel

© VDI Fachmedien GmbH & Co. KG, Düsseldorf 2025