

# Nachhaltigkeits- berechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 112

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

# Nachhaltigkeits- berechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken

von

Ulrike Kuhlmann  
Philippa Maier

Universität Stuttgart  
Institut für Konstruktion und Entwurf

Thomas Ummenhofer  
Tim Zinke

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine

Matthias Fischer  
Sarah Schneider

Universität Stuttgart,  
Lehrstuhl für Bauphysik  
Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 112

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt FE 089.0291/2013:**  
Untersuchung zur Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken

**Fachbetreuung:**  
Eugen Rogalski

**Herausgeber**  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0  
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9293  
ISBN 978-3-95606-141-7

Bergisch Gladbach, Februar 2015

## Kurzfassung – Abstract

### Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken

Am Beispiel einer real ausgeführten Verbundbrücke als Referenzbauwerk werden hier im Rahmen einer Nachhaltigkeitsanalyse drei Varianten des Korrosionsschutzes untersucht. Über den gesamten Lebenszyklus dieser integralen Autobahnüberführung wird eine Ökobilanz erstellt, die Lebenszykluskosten sowie die externen Effekte (Umweltwirkungen aus Fahrzeugbetrieb, Fahrzeugbetriebskosten und Verspätungskosten) ermittelt und für die drei Varianten verglichen. Dabei ist eine herkömmliche organische Beschichtung, die während des Lebenszyklus zweimal erneuert wird mit einer Feuerverzinkung zu vergleichen. Betrachtet wird als weitere Variante in den Analysen eine Feuerverzinkung, bei der nach 66 Jahren das Aufbringen einer organischen Beschichtung erfolgt.

Im Rahmen der Ökobilanz werden sechs Wirkungskategorien ausgewiesen. Bei Ausführung der Feuerverzinkung ergeben sich Einsparungen über den gesamten Lebenszyklus im Vergleich zur organischen Beschichtung. Die Umweltwirkungen aus dem Herstellungsprozess der Feuerverzinkung sind in der Ökobilanz deutlich sichtbar und demnach nicht zu vernachlässigen. Allerdings können diese erhöhten Auswirkungen in der Herstellung durch Einsparungen während der Nutzungsphase kompensiert werden.

Die Berechnungen der Lebenszykluskosten zeigen, dass sich bereits für die Herstellungskosten eine Reduzierung durch den Einsatz einer Feuerverzinkung ergibt. Darüber hinaus sind bei der Variante der Feuerverzinkung weniger eingreifende Instandhaltungsmaßnahmen während der Nutzungsphase notwendig, sodass in Bezug auf die Lebenszykluskosten die Feuerverzinkung die absolut geringsten Kosten aufweist.

Die externen Effekte können einerseits in die Ökobilanz integriert und andererseits über einen Monetarisierungsansatz als externe Kosten ausgewiesen werden. Die durch Baumaßnahmen verursachten Eingriffe in den Verkehr (geänderte Geschwindigkeiten) lassen gegenüber der Normalstrecke veränderte Schadstoffausstöße und Treibstoffverbräuche entstehen. Diese Emissionen verursachen für die hier untersuchten Varianten Umweltwirkungen, die

in der Größenordnung der Emissionen des Brückenbauwerks bzw. auch darüber liegen. Bei der Berechnung von Fahrzeugbetriebskosten und Verspätungskosten übersteigen auch diese die Lebenszykluskosten des Brückenbauwerks in allen Varianten. Im Vergleich mit einer organischen Beschichtung ergeben sich für die untersuchte Referenzbrücke über den Lebenszyklus reduzierte externe Effekte für die Feuerverzinkung, gefolgt durch das Duplexsystem.

Zusammenfassend ergibt sich für die hier untersuchte Referenzbrücke die Variante der Feuerverzinkung als die Lösung, die den größten Beitrag zu nachhaltigen Entwicklung leistet. Da es sich um eine Referenzbrücke mit klar definierten Randbedingungen handelt, ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Brückenbauwerke nicht ohne Weiteres gegeben. So kann bei einem geringeren durchschnittlichen täglichen Verkehr (DTV) die Bedeutung der externen Effekte stark zurückgehen. Die Ergebnisse sind damit als einzelfallbezogen einzustufen.

### Hot-dip galvanized steel bridges according to criteria of sustainability

Based on a built steel-composite bridge as reference case three different systems of corrosion protection are analyzed according to criteria of sustainability. Over the entire life-cycle of an integral motorway crossing a life-cycle environmental analysis and a life-cycle costs analysis are carried out and external effects (environmental inputs caused by vehicle operating, vehicle operating costs and traffic delay costs) determined and compared for the three variants. A traditional organic coating which is renewed twice during the operation stage is compared to a hot-dip galvanization. As third variant a hot-dip galvanization being coated after 66 years with an organic corrosion protection is analyzed

In the framework of the life-cycle analysis six environmental indicators are adopted. The hot-dip galvanization leads to a reduction of environmental inputs over the entire life-cycle compared to the organic coating. The environmental inputs caused during production stage by the hot-dip galvanization

are visible in the life-cycle environmental analysis and should therefore not be neglected. However these increased inputs due to the production stage are compensated during the operation stage.

The life-cycle costs analysis shows that the construction costs are reduced due to the hot-dip galvanization. In addition the hot-dip galvanization requests less maintenance actions during the operation stage so that the hot-dip galvanization leads in total to the lowest life-cycle costs.

On one hand the external effects can be integrated in the life-cycle environmental analysis and on the other hand can be given as external costs by a monetary evaluation. Construction and maintenance actions cause traffic restrictions (e.g. changed traffic velocities) and therefore compared with the undisturbed traffic lead to changed pollutant emissions and changed fuel consumptions. For the analyzed variants these emissions lead to environmental inputs of the same order or even bigger than the ones caused by the bridge structure itself. The calculation of vehicle operating costs and traffic delay costs also show higher values for all variants than the life-cycle costs of the bridge structure itself. For the entire life-cycle of the reference bridge the hot-dip galvanization leads to reduced external effects.

It can be concluded that for the analyzed reference bridge the variant of the hot-dip galvanization contributes the most to a sustainable development. As a bridge with specific boundary conditions was analyzed, results may not be transferred to other bridge structures without further analyses. For a reduced average daily traffic (ADT) the influence of the external effects decreases. Results should be regarded on a case-by-case basis.

## Inhalt

|          |   |    |          |   |    |
|----------|---|----|----------|---|----|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b> .....   | 7  | <b>5</b> | <b>Lebenszykluskosten</b> .....               | 18 |
| 1.1      | Anlass und Motivation .....                                     | 7  | 5.1      | Grundlagen .....                              | 18 |
| 1.2      | Zielsetzung dieses Vorhabens .....                              | 7  | 5.2      | Systemgrenzen .....                           | 19 |
| <b>2</b> | <b>Stand der Wissenschaft<br/>und Technik</b> .....             | 8  | 5.3      | Eingangsdaten .....                           | 19 |
| 2.1      | Nachhaltigkeit im Brückenbau .....                              | 8  | 5.4      | Ergebnisse Lebenszykluskosten .....           | 19 |
| 2.2      | Korrosionsschutz im Brückenbau .....                            | 8  | <b>6</b> | <b>Externe Effekte</b> .....                  | 21 |
| <b>3</b> | <b>Nachhaltigkeitsanalyse</b> .....                             | 11 | 6.1      | Grundlagen .....                              | 21 |
| 3.1      | Allgemeines .....   | 11 | 6.2      | Systemgrenzen .....                           | 21 |
| 3.2      | Ökobilanz .....   | 11 | 6.3      | Eingangsdaten .....                           | 22 |
| 3.3      | Lebenszykluskosten .....  | 11 | 6.4      | Externe Kosten .....                          | 24 |
| 3.4      | Externe Effekte .....   | 11 | 6.5      | Zusammenfassung –<br>Externe Kosten .....     | 25 |
| 3.5      | Referenzbrücke .....  | 12 | <b>7</b> | <b>Zusammenfassung und<br/>Ausblick</b> ..... | 25 |
| 3.6      | Analyseablauf .....   | 12 | 7.1      | Zusammenfassung .....                         | 25 |
| 3.7      | Korrosionsschutz .....  | 13 | 7.2      | Ausblick .....                                | 26 |
| 3.8      | Analyse weiterer Kriterien .....                                | 13 | <b>8</b> | <b>Danksagung</b> .....                       | 26 |
| <b>4</b> | <b>Ökologische Analyse</b> .....                                | 14 | <b>9</b> | <b>Literatur</b> .....                        | 27 |
| 4.1      | Berechnungsgrundlage .....                                      | 14 |          |   |    |
| 4.2      | Systemgrenzen .....   | 14 |          |   |    |
| 4.3      | Wirkungskategorien .....  | 15 |          |   |    |
| 4.4      | Auswertung der drei Varianten .....                             | 15 |          |   |    |
| 4.4.1    | Allgemeines .....   | 15 |          |   |    |
| 4.4.2    | Treibhauspotenzial GWP .....                                    | 15 |          |   |    |
| 4.4.3    | Ozonabbaupotenzial .....  | 16 |          |   |    |
| 4.4.4    | Versauerungspotenzial .....                                     | 16 |          |   |    |
| 4.4.5    | Eutrophierungspotenzial .....                                   | 16 |          |   |    |
| 4.4.6    | Photochemisches<br>Oxidantienbildungspotenzial .....            | 17 |          |   |    |
| 4.4.7    | Primärenergiebedarf aus nicht<br>regenerativen Ressourcen ..... | 18 |          |   |    |
| 4.5      | Zusammenfassung der<br>ökologischen Analyse .....               | 18 |          |   |    |



# 1 Einleitung

## 1.1 Anlass und Motivation

Da Stahlbrücken vor allem im Bereich des Großbrückenbaus vorkommen und Verbundbrücken im gesamten Spannweitenbereich anzutreffen sind, ist deren verkehrstechnische Bedeutung in der Regel sehr hoch. Jegliche Nutzungseinschränkungen sind zu minimieren, damit Folgekosten, Umweltwirkungen und Verkehrsbehinderungen so gering wie möglich gehalten werden. Während des langen Lebenszyklus von rechnerischen 100 Jahren sind für Brückenbauwerke die Verkehrssicherheit, Stand-sicherheit und die Dauerhaftigkeit sicher zu stellen. Dabei sind bedingt durch Umwelt- und Verkehrseinflüsse diverse Auswirkungen auf die Brückenstruktur und deren Details, wie Korrosion, Karbonatisierung, Ermüdung etc., zu beachten. Gerade für Stahl- und Verbundbrücken stellt der Korrosionsschutz einen wichtigen Aspekt dar. Um dem steigenden Unterhaltungsaufwand von Stahloberflächen zu begegnen, ist frühzeitig in der Planung von Neubauprojekten die Wahl von nachhaltigen Korrosionsschutzmaßnahmen einzubeziehen und sind somit effektive Brückenlösungen zu erstellen. Ein Vergleich von Korrosionsschutzsystemen soll hier die Auswirkungen auf die ganzheitliche Betrachtung eines Referenzbauwerks über den gesamten Lebenszyklus veranschaulichen. Es ist vom ökonomischen und volkswirtschaftlichen Vorteil, Brückenlösungen unter Einbeziehung der Gesamtlebensdauer zu optimieren und ganzheitlich unter Einbeziehung aller Auswirkungen zu bewerten.

Da während des langen Lebenszyklus eine Vielzahl von Instandsetzungsmaßnahmen vorzunehmen sind, spielt der Zeitpunkt und die Größe der Maßnahmen eine wichtige Rolle. Für die Aufrechterhaltung des Korrosionsschutzes ist die Feuerverzinkung für Brückenbauwerke ein vielversprechender Ansatz im Vergleich zur organischen Beschichtung. Da bei ausreichendem Zinküberzug mit einer Schutzdauer in der Größenordnung der Lebensdauer der Brückentragwerke zu rechnen ist, kann auf aufwendige Instandsetzungsmaßnahmen in der Nutzungsphase verzichtet und somit Verkehrseinschränkungen reduziert werden. Es wird davon ausgegangen, dass entsprechend der zustandsbestimmenden Instandhaltungsstrategie (FOSTA P843 – NaBrü, 2014) eine organische Beschichtung rechnerisch zweimalig während des Lebenszyklus von Brücken einer Vollerneuerung zu unterziehen ist.

Das Feuerverzinken wird hier als Korrosionsschutz für Stahlträger im Brückenbau nach Aspekten der Nachhaltigkeit untersucht. Der Prozess des Feuerverzinkens wird hier erstmalig für ein Brückentragwerk unter einem ganzheitlichen Betrachtungsansatz analysiert, um sowohl Kosten als auch Emissionen und Verkehrseinschränkungen über den gesamten Lebenszyklus zu quantifizieren.

In Deutschland wurden bisher lediglich Fußgängerbrücken mit einer Feuerverzinkung ausgeführt. Offene Fragestellungen der Ermüdungssicherheit von feuerverzinkten Brücken wurden in einem Projekt unter Federführung des Lehrstuhls für Stahlbau der TU Dortmund (FOSTA P835, 2014) beantwortet. In einem Pilotbauwerk soll nun erstmalig die Feuerverzinkung auch im Straßenbrückenbau Anwendung finden. Mit den hier durchgeführten Untersuchungen unter ganzheitlichen Gesichtspunkten soll geprüft werden, ob die Feuerverzinkung eine konkurrenzfähige Lösung.

## 1.2 Zielsetzung dieses Vorhabens

Ziel des Forschungsprojekts ist es, Hilfestellungen für die Planung von Stahlverbundbrücken in Hinblick auf eine lebensdauerorientierte Ausführung des Korrosionsschutzes zu erarbeiten und zur Verfügung zu stellen. Die Bearbeitung erfolgt auf Grundlage von Realdaten einer mit herkömmlicher Korrosionsschutzbeschichtung ausgestatteten Verbundbrücke (FOSTA P843 – NaBrü, 2014). Der Ansatz von realitätsnahen Randbedingungen eines typischen Referenzbauwerks soll die direkte Verwendung der Ergebnisse vereinfachen. Eine Gegenüberstellung in Hinblick auf den Korrosionsschutz erfolgt hier anhand von verschiedenen Bewertungsmethoden am Beispiel einer integralen Autobahnüberführung in Verbundbauweise. Die Spannweite beträgt 45 Meter. Dabei wird für die Stahlträger eine organische Korrosionsschutzbeschichtung mit einer Feuerverzinkung und einem während der Nutzungsphase hergestellten Duplex-System verglichen. Für das Beispielbauwerk werden Einflüsse der drei Szenarien auf die Analysekatoren aufgezeigt. Die Verbundbrücke wird über den gesamten Lebenszyklus, von der Herstellung, über die Nutzung bis zum Abriss betrachtet.



## 2 Stand der Wissenschaft und Technik

### 2.1 Nachhaltigkeit im Brückenbau

Brückenbauwerke stellen einen unentbehrlichen Bestandteil der Infrastruktur dar und umfassen ein großes öffentliches Investitionsvolumen. Im Vergleich zum Hochbau handelt es sich bei Brücken um besonders langlebige Bauwerke mit einer planmäßigen Nutzungsdauer von 100 Jahren. Es ist daher ersichtlich, dass der Nachhaltigkeit im Brückenbau ein besonderes Augenmerk geschenkt werden muss. In der heutigen Vergabepaxis im Brückenbau wird jedoch meist der Bieter beauftragt, der die geringsten Neubaukosten ausweist. Dies führt nicht zwangsweise zu langlebigen und zur nachhaltigen Entwicklung beitragenden Brücken. Durch eine ganzheitliche Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus sollen alternative Kriterien auch für die Vergabe ermöglicht werden. Gerade bei Infrastrukturbauwerken wie Brücken, die öffentlich finanziert und unterhalten werden, kommt dem Nachhaltigkeitsgedanken eine besondere Bedeutung zu, denn so können neben ökologischen Qualitäten auch soziokulturelle und funktionale Aspekte, wie zum Beispiel Effekte wie Stausituationen, die ebenfalls Einfluss auf ökologische und ökonomische Aspekte haben, in die Entscheidungsfindung eingehen. Durch die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus wird bereits in der Planungsphase eine Optimierung im Sinne der Nachhaltigkeit ermöglicht.

Im Forschungsvorhaben „Ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundbrücken nach Kriterien der Nachhaltigkeit“, kurz NaBrü, wird eine ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundbrücken durch die Analyse der drei Aspekte der ökologischen Qualität, der ökonomischen Qualität und der sozialen und funktionalen Qualität anhand von drei Brückentypen durchgeführt, (FOSTA P843 – NaBrü, 2014), (KUHLMANN, et al., 2011) (BECK, et al., 2013) (FRIEDRICH, et al., 2013). Der Stand der Technik ist vom Projektteam in Veröffentlichungen (BECK, et al., 2011) (KUHLMANN, et al., 2011) (ZINKE, et al., 2011) (MAIER, et al., 2011) (BECK, et al., 2013) von Projektpartnern dargestellt worden und wird hier nicht noch einmal zusammengefasst.

### 2.2 Korrosionsschutz im Brückenbau

Die Lebensdauer von Stahl- und Verbundbrückenkonstruktionen wird stark durch Umweltbelastun-

gen beeinflusst. Ein effektiver Schutz vor Korrosion ist im Brückenbau unabdingbar. Dazu ist mit einer Lebensdauer von 100 Jahren zu rechnen, was ein langer Erhalt der Schutzdauer voraussetzt. In Deutschland sind im Straßennetz über 1.200 Stahl- und Verbundbrücken zu schützen, die eine Stahlfläche von mehr als 15 Millionen Quadratmetern aufweisen. Als Korrosionsschutz kommen standardmäßig mehrschichtige Korrosionsschutzsysteme aus organischen Beschichtungen zum Einsatz. Im deutschen Brückenbau ist lediglich bei Verkehrszeichenbrücken sowie nichttragenden Bauteilen wie Geländer, passive Schutzvorrichtungen, Lagern, Fahrbahnübergängen und Lärmschutzwänden die Feuerverzinkung verbreitet. Darüber hinaus kommt das Feuerverzinken als Korrosionsschutz für Fußgängerbrücken und Stegen zur Anwendung. Die erste für Kraftfahrzeuge zugelassene feuerverzinkte Stahlbrücke in Deutschland wurde 1987 im Sauerland über die Lenne errichtet und auf ein maximal zulässiges Gesamtgewicht von 12 Tonnen beschränkt (Schweizerische Fachstelle Feuerverzinken, 2013). Ein weiteres Korrosionsschutzverfahren ist die Kombination der Verzinkung und eines Beschichtungssystems zum sogenannten Duplex-System. Die Schutzdauer eines Duplex-Systems ist in der Regel länger als die Summe der Einzelschutzdauern von Feuerverzinkung und Beschichtung, da hier auch gegenseitige Schutzmechanismen wirksam sind (Merkblatt 405, 2005).

Neben dem passiven Korrosionsschutz ist der konstruktive Korrosionsschutz als integraler Bestandteil der Planung zu beachten, indem durch bauliche Maßnahmen Wasseransammlungen oder der Angriff korrosiver Medien am Bauwerk vermieden werden. Der aktive Korrosionsschutz durch Einsatz von korrosionsbeständigen Werkstoffen wird im Brückenbau durch Verwendung von wetterfestem Stahl, der durch eine zusätzliche Metall-Legierung eine Schutzpatina ausbildet, planerisch berücksichtigt.

Zusammenfassend lassen sich die passiven Korrosionsschutzverfahren von Stahlkonstruktionen auflisten und werden im Folgenden näher erläutert:

- A. Beschichtung der Stahloberfläche durch flüssige oder pulverförmige Beschichtungsstoffe.
- B. Aufbringung von metallischem Überzug im Schmelztauchverfahren wie das Feuerverzinken.
- C. Duplex-Systeme als Kombination von Beschichtungsverfahren und metallischen Überzügen.

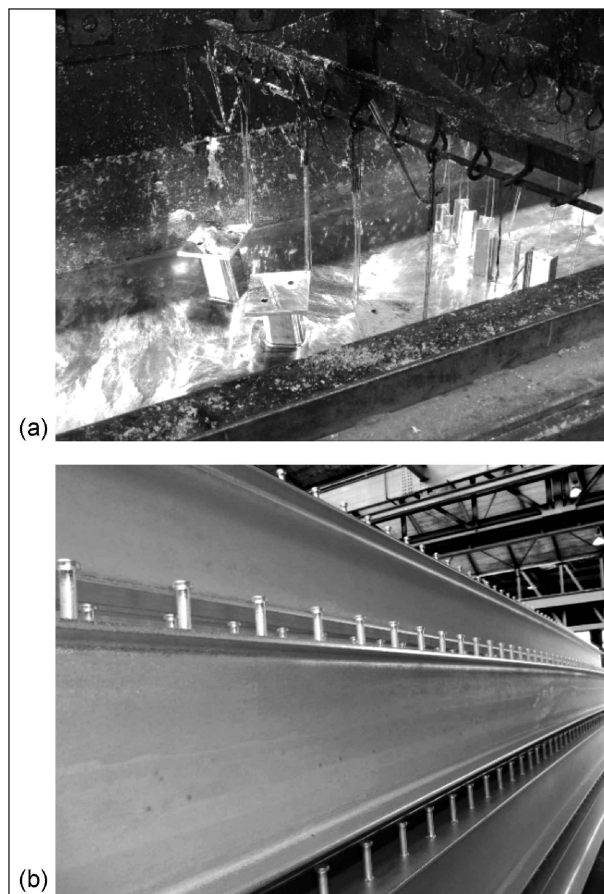
## A. Beschichtung

Üblicherweise besteht ein Beschichtungssystem aus einer Grundschicht, (einer oder mehrerer) Zwischenschichten und einer Deckschicht. Dabei stellt die Grundbeschichtung die Haftung der weiteren Beschichtungen auf der Oberfläche sicher. Die Zwischenbeschichtung wird meist mit korrosionshemmenden Pigmenten (Epoxidharz oder Polyurethan) versehen um die Korrosionsschutzwirkung zu erzielen. Die Deckbeschichtung ist für die Wetterbeständigkeit verantwortlich und nimmt häufig auch eine dekorative Funktion wahr. Eine Abstimmung der Schichten hat nach den zu erwartenden Korrosionsbelastungen zu erfolgen und ist in DIN EN ISO 12944-2 (DIN EN ISO 12944-2, 1998) normativ geregelt. Ergänzend liefert die ZTV-ING im Teil 4, Abschnitt 3 (BAST, Dez. 2012) Regelungen für den Korrosionsschutz.

Brückenträger aus Stahl werden in der Regel mit mehrschichtigen Korrosionsschutzbeschichtungen versehen, die erfahrungsgemäß in Abständen von 25 bis 35 Jahren erneuert werden müssen. Diese Erneuerungen des Korrosionsschutzes verursachen nicht nur Kosten für die Baumaßnahme an sich, sondern führen häufig auch zu einer Nutzungseinschränkung und darüber hinaus zu Emissionen in die Umwelt.

## B. Feuerverzinkung

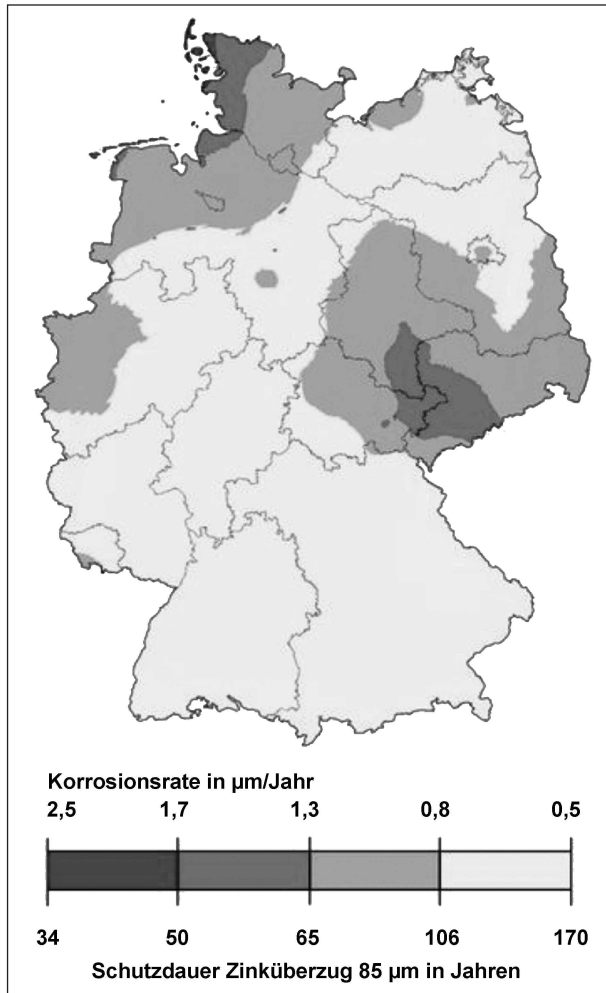
Die Feuerverzinkung ist im Stahlbau das verbreitetste Korrosionsschutzverfahren durch metallischen Überzug. Die Ausführung kann nicht auf der Baustelle erfolgen, sondern unter kontrollierten Fertigungsbedingungen in einer Feuerverzinkerei nach DIN EN ISO 1461 (DIN EN ISO 1461, 2009). Nach einer Oberflächenvorbereitung und chemischer Reinigung zum Entfernen von Rost und Walzspuren werden die Stahlteile getrocknet und in einem Tauchbad mit schmelzflüssigem Zink bei einer Temperatur von 450 °C mit Zink überzogen, siehe Bild 1. Der Stahl reagiert mit dem flüssigen Zink und an der Stahloberfläche bilden sich Eisen-Zink-Legierungsschichten. Diese weisen eine größere Härte als Stahl auf und verfügen somit über hohe Abriebs- und Verschleißfestigkeit. Mechanische Beschädigungen während des Transports und Montage sind somit selten zu befürchten. Gerade die für Beschichtungssysteme kritischen Ecken und Kanten (dünnere Beschichtungsdicke) stellen durch das senkrechte Wachsen des Zinküberzugs keine Gefahr dar und verfügen häufig über einen größe-



**Bild 1:** Feuerverzinken von Stahlbauteilen (a) Entnahme aus dem Kessel (b) Feuerverzinkte Träger

ren Zinküberzug und somit über einen verbesserten Schutz vor Korrosion.

Zink bildet infolge atmosphärischer Bewitterung Deckschichten aus, die den Schutz der Stahloberfläche übernehmen. Diese Deckschichten werden durch Wind und Wetter abgetragen, erneuern sich jedoch ständig durch das darunter befindliche Zink. Mit dem Verlauf der Zeit werden somit Zinküberzüge immer dünner, wobei jedoch der jährlich zu erwartende Abtrag durch die Atmosphäre stark beeinflusst wird. Von einem zeitlich gleichmäßigen Zinkabtrag ist in der Regel auszugehen. Die zu erwartende Dauer der Korrosionsschutzwirkung lässt sich somit anhand der Korrosionsbelastung, die vorrangig vom Bauwerksstandort abhängig ist, über die Zinküberzugsdicke bestimmen. In DIN EN ISO 12944-2 (DIN EN ISO 12944-2, 1998) sind für atmosphärische Umgebungsbedingungen eine Unterteilung in Korrosivitätskategorien vorgenommen und für Zink der dazugehörige jährliche Dickenverlust angegeben. Die Zinkkorrosionskarte des Umweltbundesamtes in Bild 2 zeigt den jährlich rechnerisch zu erwartenden Zinkabtrag. Ein Vergleich



**Bild 2:** Zinkkorrosionskarte des Umweltbundesamtes (Institut Feuerverzinken, 2014a)

von Tabelle 1 mit der in Bild 2 dargestellten Deutschlandkarte zeigt, dass in Deutschland mit Ausnahme der Küstengebiete die Korrosivitätskategorien C2 und C3 vorliegen. Für Deutschland ist somit von einem jährlichen Zinkabtrag zwischen 0,5 und 1,7 Mikrometer pro Jahr, mit Ausnahme weniger Küstenbereiche, auszugehen, (Institut Feuerverzinken, 2014a). Für den im Hochbau durchschnittlichen Zinküberzug von 85 Mikrometern ist somit eine Schutzdauer von mindestens 50 Jahren sichergestellt. Für den Brückenbau kann die Lebensdauer des Korrosionsschutzes mit der Nutzungsdauer von 100 Jahren übereinstimmen, sollte die anfängliche Überzugdicke ausreichend dick gewählt werden. Hierbei ist zu beachten, dass zusätzlich zum Makroklima immer auch das Mikroklima und die Randbedingungen des Bauwerks zu berücksichtigen sind. Gerade für Autobahnbrücken und Autobahnüberführungen ist der Sprühnebelbereich bei der Bestimmung der nötigen Zinkdicken zu berücksichtigen.

| Korrosivitätskategorie | Dickenverlust von Zink [µm/a] |
|------------------------|-------------------------------|
| C1 unbedeutend         | ≤ 0,1                         |
| C2 gering              | > 0,1 – 0,7                   |
| C3 mäßig               | > 0,7 – 2,1                   |
| C4 stark               | > 2,1 – 4,2                   |
| C5 sehr stark          | > 4,2 – 8,4                   |

**Tab. 1:** Dickenverlust von Zink in Abhängigkeit der Korrosionsbelastung (DIN EN ISO 12944-2, 1998)

Für atmosphärisch beanspruchte Stahlbauteile hat sich im Hochbau das Feuerverzinken als Korrosionsschutz bewährt. Eine Korrosionsschutzdauer von vielen Jahrzehnten ohne Wartungs- und Instandhaltungszwang ist die Regel. Daher stimmen bei vielen feuerverzinkten Bauwerken des Hochbaus Schutzdauer und Nutzungsdauer überein. Als innovative Lösung für den Stahlbrückenbau verspricht das Feuerverzinken eine wirtschaftliche Korrosionsschutzmaßnahme unter Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit unter Einbezug der Lebensdauer zu sein. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Stahlkonstruktion für eine Instandhaltungsmaßnahme nur noch schwer oder gar nicht zugänglich ist oder durch die Instandhaltungsmaßnahme die Nutzung der Brücke und des darunterliegenden Verkehrs eingeschränkt wird. Dabei ist die Schutzdauer abhängig von der Qualität des Stahls (Si-beruhigt, Al-beruhigt etc.), der Qualität der Feuerverzinkung, der Ausführung der Montage und den tatsächlich vorliegenden atmosphärischen Belastungsbedingungen.

### C. Duplex-System

Duplex-Systeme bestehen gemäß DIN EN ISO 12944-5 (DIN EN ISO 12944-5, 2008) aus einer Verzinkung (überwiegend Feuerverzinkung) in Kombination mit einer (oder mehreren) Beschichtungen. Der wesentliche Vorteil des Duplex-Systems ist eine deutliche Verlängerung der Korrosionsschutzdauer, im Vergleich zu der Summe der Schutzdauern aus den jeweiligen Einzelsystemen Feuerverzinkung und Beschichtung. Es wird von einem Synergie-Effekt gesprochen, der je nach System bei einem Verlängerungsfaktor von 1,2 bis 2,5 liegen kann (Institut Feuerverzinken, 2013b). Die Wirkungsweise baut auf den gegenseitigen Schutz auf. Zum einen wird der Zinküberzug durch die darüber liegende Beschichtung vor atmosphärischen und chemischen Einflüssen und somit vor einem Abtrag geschützt. Zum anderen können

durch den Zinküberzug keine Unterrostungen der Beschichtung auftreten und trotz einer Beschädigung der Beschichtung garantiert die hohe Widerstandsfähigkeit und Abriebfestigkeit des darunterliegenden Zinküberzugs den Schutz des Stahls vor Korrosion. Ein gegenseitiger Schutz der beiden Systeme ist vor allem an Ecken und Kanten anzutreffen, an denen sich der Zinküberzug dicker ausbildet und damit verfahrensbedingte Schwachstellen der Beschichtung ausgleicht.

Eine sinnvolle Verlängerung der Schutzdauer kann durch eine nachträgliche Beschichtung einer Feuerverzinkung erzielt werden. Wird diese Instandsetzungsmaßnahme zu einem Zeitpunkt durchgeführt, zu dem das Erstsysteem als Restüberzug noch wirksam ist, können wirkungsvolle Duplex-Systeme entstehen, die die oben genannten Vorteile haben.

Alle hier angesprochenen Korrosionsschutzarten A bis C haben das Ziel für den Brückenbau eine Schutzdauer von 100 Jahren zu garantieren. Mögliche Ausbesserungen und Instandsetzungen an Fehlstellen sind frühestmöglich vorzunehmen, um weitere Schädigungen zu vermeiden. Um eine Analyse über den gesamten Lebenszyklus vornehmen zu können, ist von einer fehlerfreien Errichtung auszugehen und Maßnahmen während der Nutzungsphase in Form einer Instandhaltungsstrategie einzuplanen.

## 3 Nachhaltigkeitsanalyse

### 3.1 Allgemeines

Die Untersuchungen erfolgen unter ganzheitlichen Gesichtspunkten, um Zusammenhänge zu erfassen und Optimierungspotenziale aufzuzeigen. Es werden ökologische, ökonomische und sozial/funktionale Aspekte untersucht, für die jeweils die im Folgenden dargestellten Analyseansätze gewählt werden. Als Grundlage dient hierbei eine Autobahnüberführung als Referenzbrücke.

### 3.2 Ökobilanz

Die ökologische Bilanzierung ist eine etablierte Methode um Umweltwirkungen abzuschätzen. Produkte können während ihres gesamten Lebensweges, von der Planung über Rohstoffgewinnung, Herstellung und Nutzung bis hin zu Recycling oder Entsorgung, negativ auf die Umwelt einwirken. In

einer Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA) werden daher Stoff- und Energieströme und die damit verbundenen Umweltwirkungen über den gesamten Lebensweg betrachtet. Hier wird das vorhandene Modell aus NaBrü, (FOSTA P843 – NaBrü, 2014), (KUHLMANN, et al., 2011) (BECK, et al., 2013) (FRIEDRICH, et al., 2013), ausgebaut und angepasst, um speziell die ökologische Bedeutung der Korrosionsschutzsysteme im Gesamtsystem Brücke aufzuzeigen und dieses Kriterium in eine ganzheitliche Beurteilung einfließen zu lassen.

### 3.3 Lebenszykluskosten

Die Lebenszykluskostenrechnung (LCC) umfasst alle während des Lebenszyklus anfallenden Kosten, die direkt dem Bauwerk zuzuordnen sind. Eine Herausforderung der Lebenszykluskostenrechnung besteht in der Bestimmung des Ansatzes für die verschiedenen Instandhaltungsmaßnahmen im Lebenszyklus, die als Szenario abgebildet werden. Da die vom BMVBS mit der RI-WI-BRÜ (BMVBS, 2004) zur Verfügung gestellte Berechnungsbasis nur eine sehr überschlägige Abbildung des Lebenszyklus ermöglicht, werden die Lebenszykluskosten auf Grundlage der theoretischen Lebensdauern der einzelnen Brückenkomponenten berechnet.

### 3.4 Externe Effekte

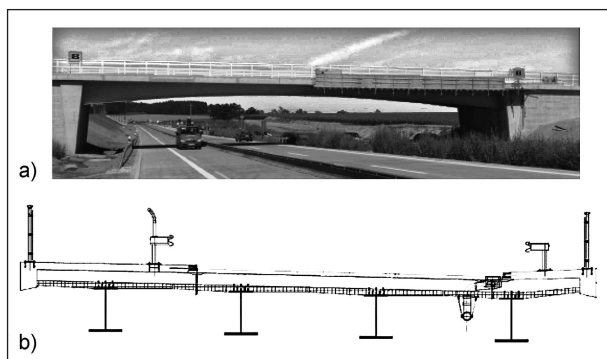
Während die direkten Kosten dem Bauwerk zugeordnet werden können, entstehen externe Effekte im Straßenverkehr durch Beeinflussung der Straßennutzer, der Anlieger und der Gesellschaft. Als Beispiel für solche externen Effekte sind Verkehrsstaus infolge Behinderungen durch Baustellen und die dadurch entstehende Zunahme des Kraftstoffverbrauchs, der Luftverschmutzung sowie der Ausfall von produktiver Arbeitszeit zu nennen. Im Verkehrswesen hat sich zur Bewertung von externen Effekten die Monetarisierung etabliert, die auch als Übersetzung in Geldeinheiten umschrieben werden kann. Mit den daraus entstehenden externen Kosten lässt sich eine Vielzahl von Auswirkungen in der sozialen Nachhaltigkeitsdimension beschreiben. Im Rahmen der zu untersuchenden Brückenvarianten wird ein im Forschungsprojekt NaBrü (FOSTA P843 – NaBrü, 2014) entwickeltes makroskopisches, deterministisches Verkehrsmodell verwendet, mit dem die oben beschriebenen externen Effekte von Baumaßnahmen als Differenz zum Normalbetrieb berechnet werden. Hier wird von einer zu überführen-

den Autobahn mit jeweils zwei Fahrstreifen und einem Seitenstreifen je Fahrtrichtung ausgegangen.

Für die Berechnungen wird dabei davon ausgegangen, dass es sich um einen Ersatzneubau handelt, der auch während der Herstellung die Grenzkapazität der unten liegenden Autobahn reduziert. Wenn das Bauwerk auf der grünen Wiese gebaut werden würde, könnte davon ausgegangen werden, dass die externen Effekte in der Herstellungsphase nahezu null seien. Die externen Effekte in den übrigen Lebenszyklusphasen blieben unverändert.

### 3.5 Referenzbrücke

Die Untersuchungen sind auf Grundlage eines realen Brückenbauwerks durchgeführt worden, wobei dessen gesamter Lebenszyklus, von der Erstellung bis zum Abriss/Rückbau, Berücksichtigung gefunden hat.



**Bild 3:** Integrale Autobahnüberführung in Stahlverbundbau; a) Längsansicht; b) Regelquerschnitt in Feldmitte

| Jahr | Instandsetzungsmaßnahmen  |
|------|---|
| 0    | Herstellung   |
| 17   | Fahrbahn: Deckschicht   |
| 33   | Vollerneuerung Korrosionsschutzbeschichtung (Variante A)                        |
|      | Fahrbahn: Deckschicht + Abdichtung<br>Kappen, Entwässerung, Schutzeinrichtungen |
| 50   | Fahrbahn: Deckschicht   |
| 66   | Vollerneuerung Korrosionsschutzbeschichtung (Variante A und C)                  |
|      | Betoninstandsetzung   |
|      | Fahrbahn: Deckschicht + Abdichtung<br>Kappen, Entwässerung, Schutzeinrichtungen |
| 83   | Fahrbahn: Deckschicht   |
| 100  | Rückbau   |

**Tab. 2:** Verwendetes Instandhaltungsszenario bezeichnet als „Zustandsbestimmende Instandhaltungsstrategie“

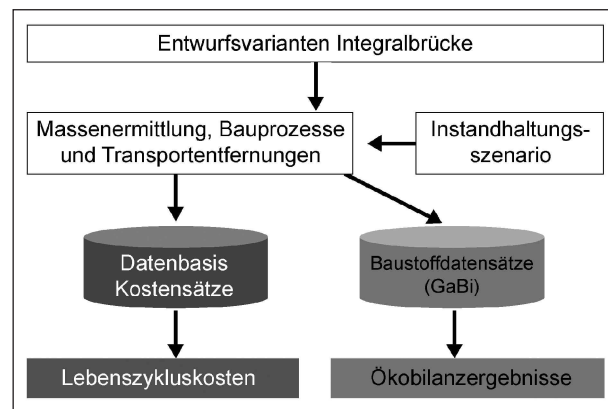
Die Referenzbrücke ist eine Brücke über eine Autobahn in Bayern. Die Fertigstellung erfolgte im Jahr 2008. Es handelt sich hier um eine integrale Autobahnüberführung in Verbundbauweise mit einer Gesamtspannweite von 45 Metern, siehe Bild 3a). Der Brückenquerschnitt umfasst vier Halbfertigteilträger mit einer Ortbetonschicht und einer Gesamtbreite von 12,25 Metern, vergleiche Bild 3b).

Für diese Brücke wurden die Bauwerksdaten sowie die Herstellungsprozesse erfasst. Für die Nutzungsphase sind sinnvolle Annahmen für die Instandhaltung getroffen worden. Dabei wird die im momentan in Bearbeitung befindlichen Forschungsprojekt NaBrü erarbeitete zustandsbestimmende Instandhaltungsstrategie zugrunde gelegt, vgl. Tabelle 2. Diese sieht eine Bündelung von Maßnahmen nach rechnerischen 33 und 66 Jahren des Lebenszyklus vor, vgl. (BECK, et al., 2013), (FOSTA P843 – NaBrü, 2014). Ebenso werden für das Ende des Lebenszyklus Annahmen für den Rückbauprozess und den Umgang mit den rückgebauten Materialien getroffen.

Für die Bearbeitung sind Vereinfachungen und Annahmen in Bezug auf die Bauausführung der Feuerverzinkung in Variante B und C getroffen worden, da lediglich reale Daten der ausgeführten Brücke (Variante A) vorliegen.

### 3.6 Analyseablauf

Auf Grundlage des im letzten Kapitel beschriebenen Referenzbauwerks werden alle notwendigen Eingangsdaten erhoben. Für die Ökobilanzierung und Lebenszykluskostenrechnung sind insbesondere die genauen Massen und alle Bauprozesse von großer Bedeutung, um die jeweiligen Ergebnisse zu berechnen. Der Analyseablauf ist in Bild 4 visualisiert.



**Bild 4:** Analyseablauf für die Ökobilanzierung und Lebenszykluskostenrechnung mit Eingangsparametern

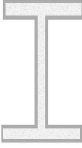
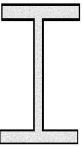

Die Systemgrenzen sind dabei für alle Berechnungsmethoden gleich, sodass die Ergebnisse untereinander konsistent sind. Das jeweilige methodische Vorgehen wird am Anfang der nachfolgenden Kapitel erklärt. Für die Berechnung der externen Effekte wurden dieselben Instandhaltungsmaßnahmen zugrunde gelegt wie für die direkten bauwerksbezogenen Berechnungen, diese werden allerdings um ihren Einfluss auf die Verkehrsführung (Dauer der Maßnahme und notwendige Verkehrsführung) erweitert. Die verwendeten Eingangswerte werden detailliert im Vorfeld der Berechnungsergebnisse der externen Effekte beschrieben.

### 3.7 Korrosionsschutz

Während der Nutzungsphase von Brückenbauwerken ist der Schutz vor Korrosion aufrecht zu erhalten. Hier werden drei Ausführungsvarianten näher untersucht. Dabei ist von einer Schutzdauer von mindestens 100 Jahren auszugehen. Der Tabelle 3 können die für die Instandhaltung anzusetzenden Maßnahmen entnommen werden.

Die Varianten werden über den gesamten Lebenszyklus betrachtet und für die Untersuchungen in allen Nachhaltigkeitsaspekten berücksichtigt.

Für die hier betrachtete zustandsbestimmende Instandhaltungsstrategie erfolgt für die den Korrosionsschutz betreffenden Maßnahmen eine Bündelung mit weiteren Instandsetzungen am Brückenbauwerk.

|   | Korrosionsschutz   | Instandhaltung   |
|---|--|--|
|  | <b>Variante A</b><br>Organische Korrosionsschutzbeschichtung                           | Kompletterneuerung der Korrosionsschutzbeschichtung im Jahr 33 und Jahr 66 des Lebenszyklus                              |
|  | <b>Variante B</b><br>Feuerverzinkung (Schichtdicke 300 µm)                             | Keine Unterhaltungsmaßnahmen des Korrosionsschutzes während des Lebenszyklus   |
|  | <b>Variante C</b><br>Feuerverzinkung (Schichtdicke 200 µm) und organische Beschichtung | Aufbringung einer organischen Korrosionsbeschichtung im Jahr 66 des Lebenszyklus auf den Restüberzug der Feuerverzinkung |

Tab. 3: Korrosionsschutzvarianten

### 3.8 Analyse weiterer Kriterien

Eine Nachhaltigkeitsanalyse für Brückenbauwerke schließt eine Vielzahl von Bewertungskriterien mit ein. Je nach Bewertungsziel und Systemgrenzen kann es erforderlich sein, einzelne Kriterien hinzuzufügen bzw. in den Analysen nicht zu berücksichtigen.

Da es sich hier analog zu der oben beschriebenen Zielstellung um einen Variantenvergleich verschiedener Korrosionsschutzsysteme bei ansonsten gleichem Brückenentwurf handelt, können Kriterien, die für alle Vergleichsvarianten dieselbe Bewertung erhalten, ausgeklammert werden. Dies ist vor allem im Bereich der sozialen Aspekte der Fall, da z. B. der Komfort bei Brückenbenutzung, dynamisches Verhalten, Lärm, Unfallkosten und Sicherheit der Nutzer für alle zu untersuchenden Varianten gleich sind. Auch im Bereich der Bauprozesse ergeben sich – bis auf die korrosionsschutzspezifischen Aspekte – keine Unterschiede zwischen den Varianten. Diese prozessualen Unterschiede werden für die zu untersuchenden Varianten bei den bauwerksbezogenen Kosten und externen Kosten berücksichtigt.

Darüber hinaus findet in diesem Projekt eine Konzentration auf Bewertungsmethoden statt, die mithilfe von auf Modellen aufbauenden Berechnungsabläufen quantitative Kennzahlen erzeugen, wodurch ein Variantenvergleich bei der Variation einzelner Parameter ermöglicht wird. Dabei werden die in Kapitel 3.2 bis 3.4 erläuterten Methoden verwendet. Der Vorteil dieser Methoden ist, dass durch das Vorliegen von Kardinalskalen eine Bestimmung der prozentualen Ergebnisveränderung in Abhängigkeit von der Untersuchungsvariante erfolgen kann. Damit ist der Abstand der jeweiligen Varianten in den Untersuchungskategorien voneinander bestimmbar.

Qualitative Bewertungen, die nach der hier verwendeten Definition mit vorgefertigten Checklisten oder Klasseneinteilungen arbeiten (z. B. drei Klassen zur Beurteilung der Schwingungsanfälligkeit: befriedigend, gering, sehr gering), werden nicht vorgenommen. Hierfür liegen in Deutschland derzeit keine allgemein anerkannten Bewertungsregeln vor. Ein ausführlicher Vorschlag für verschiedene qualitative Kriterien ist von (FOGIB, 1997) gemacht worden, darüber hinaus wird in Deutschland an einem auf Infrastrukturbauwerke abgestimmten Bewertungssystem gearbeitet (GRAUBNER, et al., 2010),

dessen Einführung derzeit allerdings noch nicht beschlossen ist. Wie beschrieben ist eine solche qualitative Bewertung aufgrund der Zielsetzung des Variantenvergleichs mit dem Fokus auf den Korrosionsschutz aber auch nicht erforderlich.

## 4 Ökologische Analyse

### 4.1 Berechnungsgrundlage

Für die ökologische Berechnung ist das vorhandene Modell aus NaBrü, (FOSTA P843 – NaBrü, 2014), (KUHLMANN, et al., 2011) (BECK, et al., 2013) (FRIEDRICH, et al., 2013), ausgebaut und angepasst worden. Die zugrunde gelegten Daten für das Brückenmodell stammen ebenfalls aus dem Forschungsvorhaben NaBrü.

Für die Berechnung der ökologischen Auswirkungen aus dem Prozess des Feuerverzinkens wurde die Umweltproduktdeklaration „Feuerverzinkte Baustähle: Offene Walzprofile und Grobbleche“ des Industrieverbands Feuerverzinken e. V. (Institut Bauen und Umwelt e. V., 2013) herangezogen. Diese Umweltproduktdeklaration wurde von der PE International AG erstellt und durch das Institut Bauen und Umwelt e. V. zertifiziert und veröffentlicht.

### 4.2 Systemgrenzen

Der Untersuchungsrahmen der untersuchten Brücke ist der gesamte Lebenszyklus. Dieser wurde in Anlehnung an (DIN EN 15978, 2012) entwickelt,

siehe Bild 5. Als ein europäisches Normdokument definiert diese Norm Festlegungen und Anforderungen an die lebenszyklusbasierte Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden.

Die Lebenszyklusphasen eines Bauwerks sind hier in verschiedene Module (A-D) aufgeteilt. Die Module A1-A3 beinhalten mit Rohstoffgewinnung, Transport und Werksfertigung die Herstellungsphase der für den Bau benötigten Materialien. Die Module A4-A5 beinhalten die Transporte zur Baustelle und den Bau, also alle Prozesse, die auf der Baustelle selbst stattfinden. Diese werden in der vorliegenden Studie nicht ausgeschlossen sondern explizit betrachtet. Maßnahmen zur Erhaltung und Instandsetzung des Bauwerks werden in der Nutzungsphase (Module B1-B3) zusammengefasst. Modul C beinhaltet den Rückbau, den Transport, eine Abfallbehandlung oder Entsorgung am Ende des Lebenszyklus. Mögliche Belastungen und Vorteile außerhalb der Systemgrenzen werden in Modul D zusammengefasst, dies beinhaltet beispielsweise Gutschriften für Thermische Energie durch die Verbrennung verschiedener Materialien am Lebensende. Die Externen Effekte werden in Modul E erfasst.

Die betrachteten Module lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- A1-A3: Herstellungsphase,
- A4-A5: Errichtungsphase,
- B1-B3: Nutzungsphase,

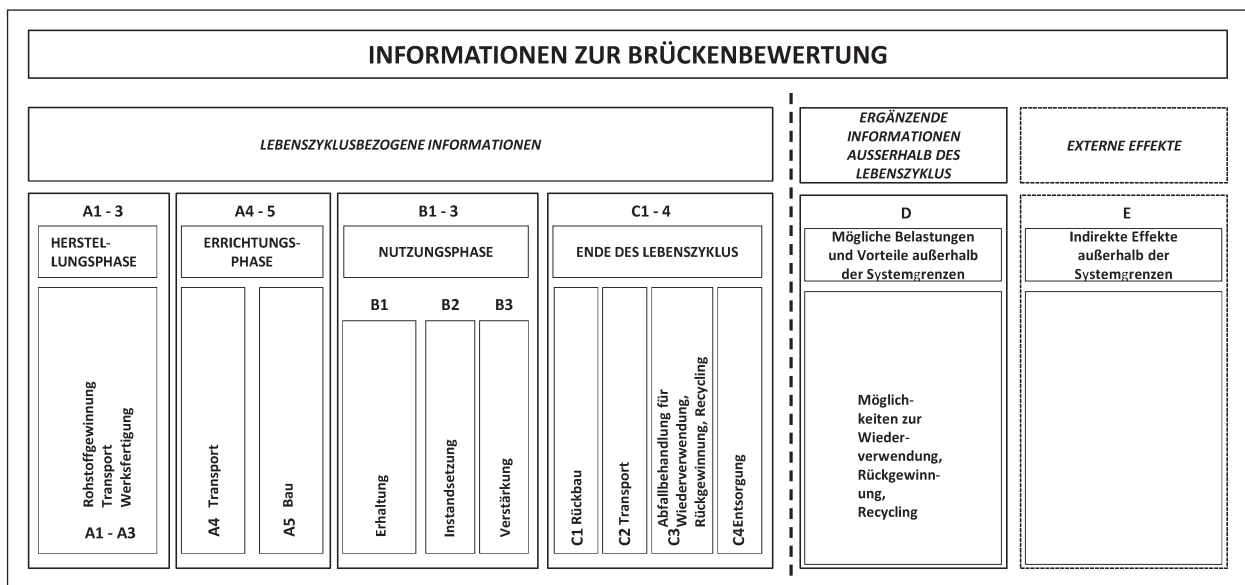


Bild 5: Systemgrenzen und Modellstruktur für die ökobilanzielle Bewertung, in Anlehnung an DIN EN15978

- C1-C4: Ende des Lebenszyklus,
- D: Informationen außerhalb Zyklus,
- E: Externe Effekte.

### 4.3 Wirkungskategorien

Die folgenden Wirkungskategorien wurden auf Grund der Relevanz für das untersuchte Produktsystem, ihrer wissenschaftlich und vollständig entwickelten Berechnungsmethoden und ihrer damit verbundenen internationalen Akzeptanz ausgewählt:

- Treibhauspotenzial (GWP) – Beitrag zum Treibhauseffekt (Klimaerwärmung) in [kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten],
- Ozonabbaupotenzial (ODP) – Beitrag zum „Ozonloch“ in [kg R11-Äquivalenten],
- Versauerungspotenzial (AP) – Beitrag zum „Sauern Regen“ in [kg SO<sub>2</sub>-Äquivalenten],
- Eutrophierungspotenzial (EP) – Beitrag zur „Überdüngung“ in [kg Phosphat-Äquivalenten],
- Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP) – Beitrag zum „Sommersmog“ in [kg Ethen-Äquivalenten],
- Primärenergiebedarf nicht erneuerbar in [MJ] als eine Darstellung des Verbrauchs von energetisch genutzten Ressourcen.

## 4.4 Auswertung der drei Varianten

### 4.4.1 Allgemeines

Die ökologischen Berechnungen wurden auf Grundlage der erhobenen Daten für die Referenzbrücke durchgeführt. Für die Nutzungsphase wurde hier die zustandsbestimmende Instandhaltungsstrategie, die im Forschungsprojekt NaBrü ausführlich erarbeitet wurde, zugrunde gelegt, (FOSTA P843 – NaBrü, 2014). Im Hinblick auf den Korrosionsschutz sind die drei in Tabelle 3 aufgeführten Varianten A bis C hier für alle in Kapitel 4.3 genannten Wirkungskategorien gegenüberzustellen. Dabei werden die Bauwerksbezogenen Umweltwirkungen für die Lebenszyklusmodule A bis D jeweils in einem Diagramm dargestellt. Mögliche Vorteile in Modul D sind hierbei mit negativen Vorzeichen in den Diagrammen enthalten und können

als Gutschrift von der Summe aus Modulen A bis C abgezogen werden.

Die externen Effekte, Modul E, beinhalten Umweltwirkungen die durch Verkehrsteilnehmer auf Grund von Baumaßnahmen an der Brücke verursacht werden und somit als Delta zum Normalbetrieb auftreten. Die externen Effekte werden dabei in die Lebenszyklusphasen Herstellung, Nutzung und Rückbau untergliedert und sind hier in separaten Diagrammen dargestellt.

### 4.4.2 Treibhauspotenzial GWP

In Bild 6 ist für die drei Varianten der verursachte Beitrag zum Treibhauspotenzial dargestellt. Für Variante B und C sind die Auswirkungen der Herstellung der Feuerverzinkung getrennt ausgewiesen und deutlich zu erkennen.

Die Einsparungen über den gesamten Lebenszyklus der Brücke betragen für Variante B knapp 5 % und für Variante C ca. 4 % gegenüber Variante A. Die Einsparungen resultieren dabei hauptsächlich aus den geänderten Instandhaltungsmaßnahmen während der Nutzungsphase.

Bei den externen Effekten hat Variante A den größten Beitrag zum Treibhauspotenzial, Variante B hingegen den geringsten, vgl. Bild 7. Die externen Effekte liegen hierbei in der Größenordnung der Wirkung aus dem gesamten Lebenszyklus der Brücke und unterliegen dabei stark schwankenden Eingangswerten, wie in Kapitel 6 näher erläutert.

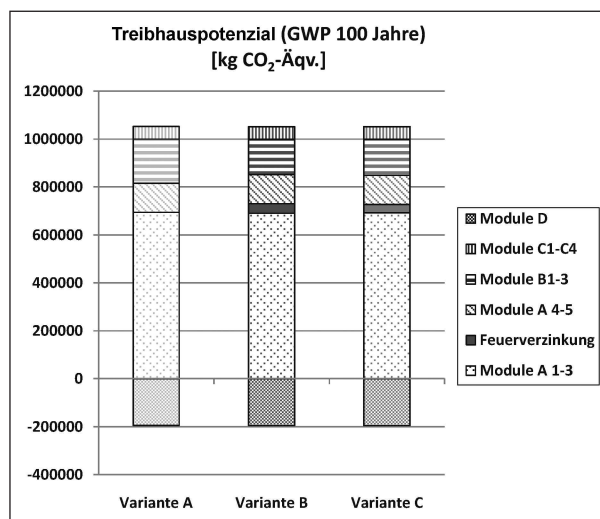
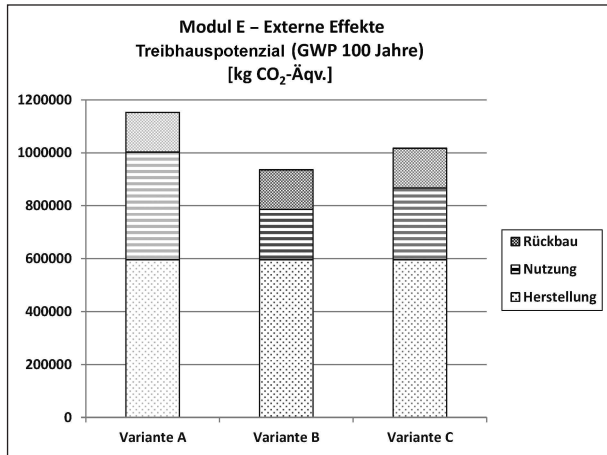
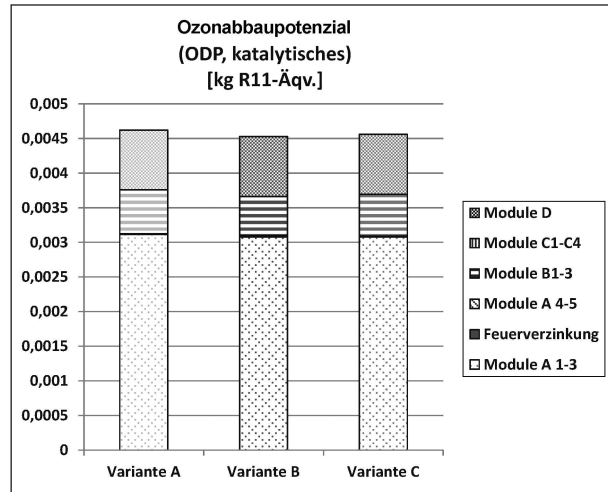


Bild 6: Treibhauspotenzial (GWP 100 Jahre) [kg CO<sub>2</sub>-Äqv.] für die drei betrachteten Varianten





**Bild 7:** Treibhauspotenzial (GWP 100 Jahre) [kg CO<sub>2</sub>-Äqv.] für die Externen Effekte der drei betrachteten Varianten

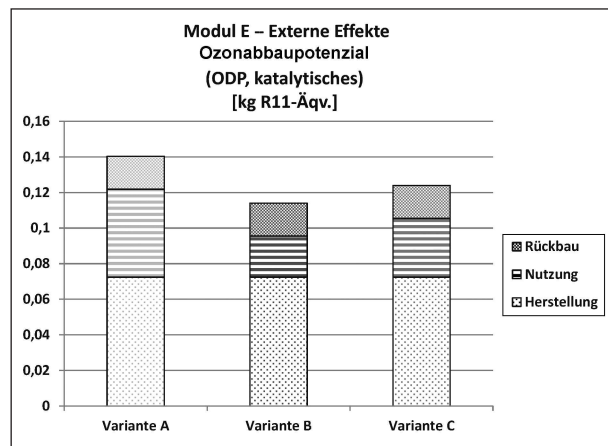


**Bild 8:** Ozonabbaupotenzial (ODP, katalytisches) [kg R11-Äqv.] für die drei betrachteten Varianten

### 4.4.3 Ozonabbaupotenzial

Im Falle des Ozonabbaupotenzials sind die Anteile der Feuerverzinkung weniger sichtbar als im Falle des Treibhauspotenzials, vgl. Bild 8. Auch hier ergeben sich Einsparungen (ca. 2 %) der Variante B und Variante C gegenüber Variante A.

Bei den externen Effekten hat auch hier Variante A den größten Beitrag zum Ozonabbaupotenzial, Variante B hingegen den geringsten, Bild 9. Die absoluten Werte übersteigen hier die aus dem Lebenszyklus der Brücke stammenden Werte um mehr als das zwanzigfache.

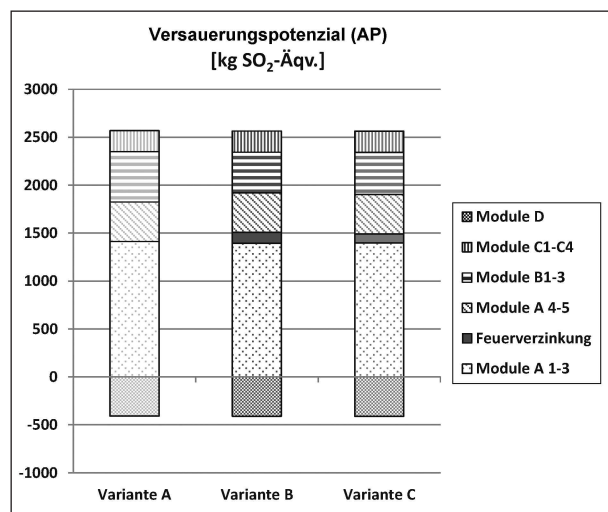


**Bild 9:** Ozonabbaupotenzial (ODP, katalytisches) [kg R11-Äqv.] für die Externen Effekte der drei betrachteten Varianten

### 4.4.4 Versauerungspotenzial

Auch in dieser Wirkungskategorie sind die Auswirkungen der Herstellung der Feuerverzinkung deutlicher zu erkennen, Bild 10. Jedoch werden auch hier – bei der Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus – geringfügig (ca. 1 %) Einsparungen bei den Varianten B und C gegenüber der Variante A erzielt.

Die Externen Effekte, Modul E, liegen in der Größenordnung des Lebenszyklus Modul A bis D und übersteigen diese geringfügig, Bild 11. Auch hier schneidet Variante B gefolgt von Variante C am besten ab.



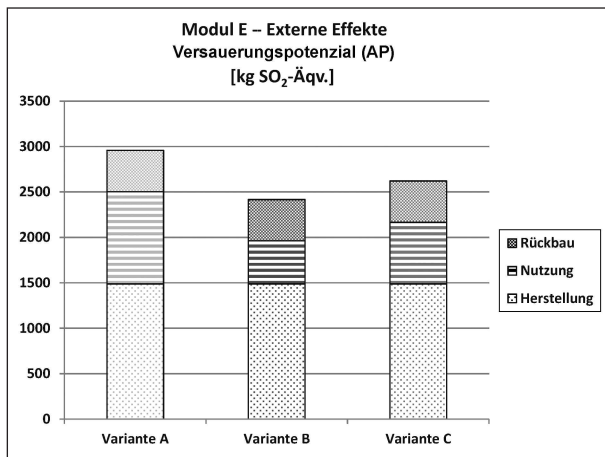
**Bild 10:** Versauerungspotenzial (AP) [kg SO<sub>2</sub>-Äqv.] für die drei betrachteten Varianten

### 4.4.5 Eutrophierungspotenzial

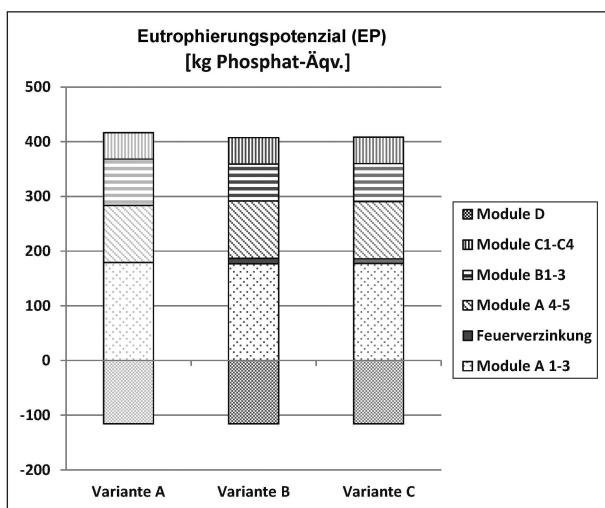
Die Auswirkungen der Herstellung der Feuerverzinkung von Variante B und C sind auch hier deutlich zu erkennen, Bild 12. Bei der Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus treten Einsparungen von rund 3 % bei den Varianten B und C gegenüber der Variante A auf.

Die Externen Effekte, Modul E, übersteigen die Wirkungen aus dem Lebenszyklus Modul A bis D

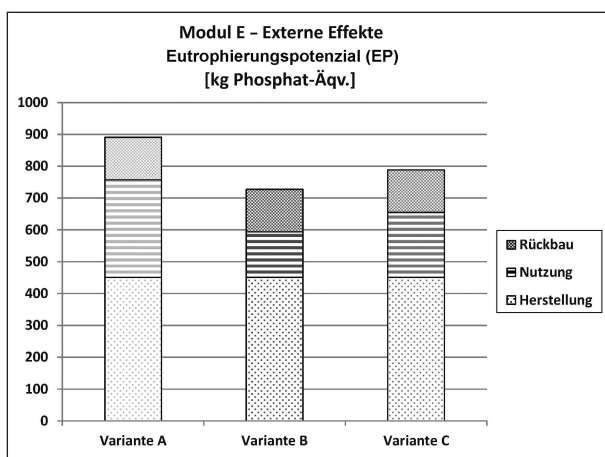
um nicht mehr als das Doppelte, Bild 13. Auch hier schneidet Variante B gefolgt von Variante C am besten ab.



**Bild 11:** Versauerungspotenzial (AP) [kg SO<sub>2</sub>-Äqv.] für die Externen Effekte der drei betrachteten Varianten



**Bild 12:** Eutrophierungspotenzial (EP) [kg Phosphat-Äqv.] für die drei betrachteten Varianten

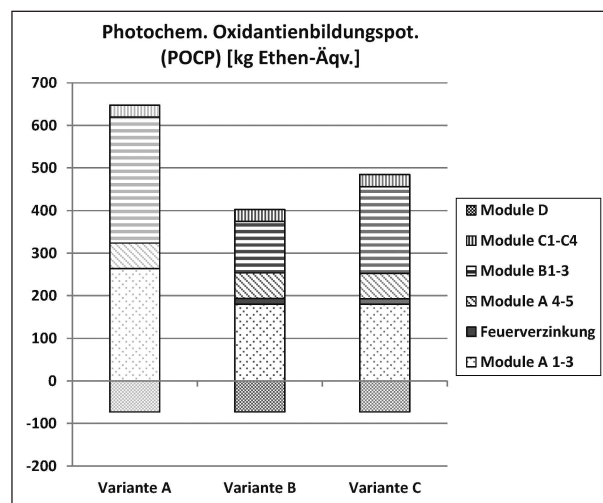


**Bild 13:** Eutrophierungspotenzial (EP) [kg Phosphat-Äqv.] für die Externen Effekte der drei betrachteten Varianten

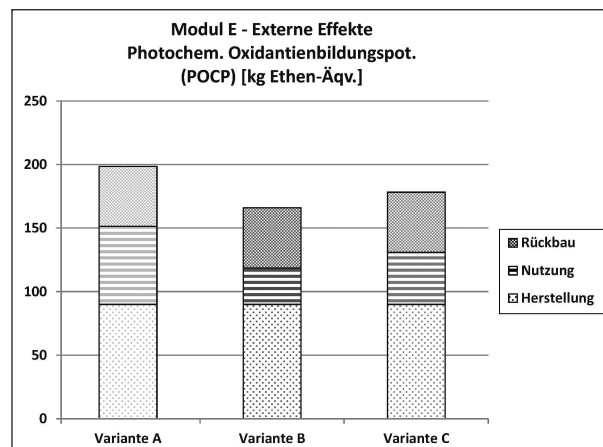
#### 4.4.6 Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial

Bei der Gegenüberstellung des photochemischen Oxidantienbildungspotenzial zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Varianten B und C zur Variante A, Bild 14. Dies wird durch die geänderten Maßnahmen während der Nutzungsphase (Modul B1-3) in der Instandsetzung verursacht. In dieser Wirkungskategorie sind ebenfalls deutliche Unterschiede in der Herstellungsphase zu erkennen. Die deutlicheren Unterschiede in dieser Wirkungskategorie gegenüber den restlichen resultieren aus dem hohen Einfluss der Korrosionsschutzbeschichtung auf das Photochemische Oxidantienbildungspotenzial. Hier können Einsparungen von rund 30 % bis 40 % erzielt werden.

Für Modul E der Externen Effekte (Bild 15) treten hier weitaus geringere Wirkungen als für den Le-



**Bild 14:** Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP) [kg Ethen-Äqv.] für die drei betrachteten Varianten



**Bild 15:** Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP) [kg Ethen-Äqv.] für die Externen Effekte der drei betrachteten Varianten

benszyklus des Brückenbauwerks auf. Auch hier wird während der Nutzungsphase durch die geringeren Verkehrsbeeinträchtigungen für Variante B und C ein optimiertes Ergebnis erzielt.

#### 4.4.7 Primärenergiebedarf aus nicht regenerativen Ressourcen

Der Primärenergiebedarf verhält sich ähnlich dem Treibhauspotenzial, hier lassen sich ca. 10 % Einsparungen bei Verwendung von feuerverzinktem Stahl erzielen, Bild 16.

Auch hier überschreiten die Externen Effekte in Modul E den Primärenergiebedarf für Modul A bis D, Bild 17.

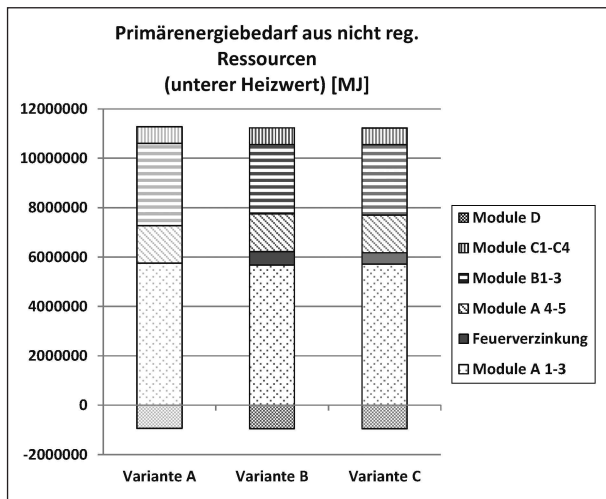


Bild 16: Primärenergiebedarf aus nicht reg. Ressourcen (unterer Heizwert) [MJ] für die drei betrachteten Varianten

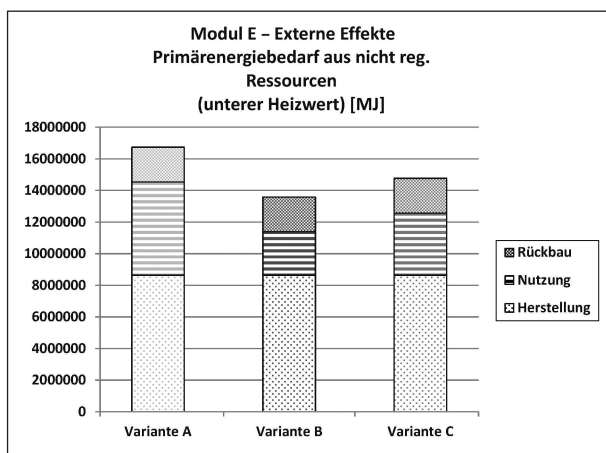


Bild 17: Primärenergiebedarf aus nicht reg. Ressourcen (unterer Heizwert) [MJ] für die Externen Effekte der drei betrachteten Varianten

## 4.5 Zusammenfassung der ökologischen Analyse

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass der Anteil der Feuerverzinkung in den hier betrachteten Wirkungskategorien in der Herstellung zwar sichtbar ist, sich jedoch Einsparungen der Umweltauswirkungen – über den gesamten Lebenszyklus – erreichen lassen. Diese Einsparungen ergeben sich aus den geänderten Instandsetzungsmaßnahmen während der Nutzungsphase. Vergleicht man die Varianten B und C lässt sich zusammenfassend sagen, dass bei der Variante B mit einer Zinkschichtdicke von 300 µm die Phase des Feuerverzinkens leicht höhere Umweltauswirkungen gegenüber der Variante C mit einer Zinkschichtdicke von 200 µm hat, über den gesamten Lebenszyklus sich jedoch geringfügige Einsparungen für Variante B erreichen lassen, da die Korrosionsschutzbeschichtung – in der Nutzungsphase – hier im Vergleich zur Duplex-Variante (Variante C) entfällt.

Die Externen Effekte unterliegen sehr starken Schwankungen in den Eingangswerten. Maßgebende Eingangswerte sind nicht nur der unter der Brücke verkehrende DTV sondern auch die Ansätze für Bauzeiten und Verkehrsführungen während der Instandsetzung und Baumaßnahmen. Für die hier angenommenen Randbedingungen liegen die Umweltwirkungen der Externen Effekte überwiegend in der Größenordnung der Effekte des Brückenbauwerks an sich (Modul A-D) und überschreiten diese in vielen Fällen sogar.

Bei der ökonomischen Betrachtung ist abschließend zu erwähnen, dass es sich bei dieser Brücke um eine Einzelfallbetrachtung handelt und sich somit diese Einsparungen nicht grundsätzlich und ohne weitere Untersuchungen pauschal auf andere Brücken oder Bauwerke übertragen lassen.

## 5 Lebenszykluskosten

### 5.1 Grundlagen

Die Berechnung der Lebenszykluskosten (Life-Cycle Costs, LCC) erfolgt analog zu den in den vorherigen Kapiteln dargestellten Ergebnissen auf Basis der zustandsbestimmenden Instandhaltungsstrategie (FOSTA P843 – NaBrü, 2014). Grundsätzlich ist zu sagen, dass es sich um ein Referenzbauwerk handelt, bei dem mit Mittelpreisansätzen gerechnet wird. Die tatsächlichen im

Zuge der Ausführung entstehenden Kosten können je nach Region, Randbedingungen, Anbieterstruktur, Exposition usw. abweichen. Alle Eingangsdaten stellen Mittelpreisansätze dar und der Preisstand ist 2012. Die Berechnungen erfolgen auf Bauwerksebene und sind keine Detailvergleiche der Herstellungskosten bei Einsatz verschiedener Korrosionsschutzsysteme. Vielmehr soll die Höhe der gesamten Lebenszykluskosten auf Bauwerksebene unter Berücksichtigung der Instandhaltungsstrategie und der weiteren Kostenstellen (Baustelleneinrichtung, Verkehrsführung, usw.) dargestellt werden.

## 5.2 Systemgrenzen

Als zeitliche Systemgrenze wird, wie bei den Analysen der weiteren Nachhaltigkeitsdimensionen auch, ein Lebenszyklus von 100 Jahren gewählt. Die räumliche Systemgrenze ist das Bauwerk selber sowie alle zur Bauwerkserstellung erforderlichen Maßnahmen. Darin enthalten sind die Kosten für die Baustelleneinrichtung und Verkehrsführung.

Die verwendeten Kosten basieren auf Nettopreisen und enthalten keine Verwaltungsgebühren oder Zinsen für Fremdkapital. Planungskosten sind auf Basis der HOAI-Ansätze integriert.

Die Kostensätze in der Nutzungsphase sind als reale Kosten zu verstehen (d. h. nach Abzug der Inflation), daher wird als Diskontierungszinssatz ein niedriger Wert von 2 % verwendet (inflationbereinigt). Die Wahl des Diskontierungszinssatzes hat einen deutlichen Einfluss auf die Gesamthöhe der Lebenszykluskosten und eine Parameterstudie sollte immer Bestandteil der Analysen sein. Da hier auch ein höherer Zinssatz die grundsätzliche Aussage der Ergebnisse (siehe Kapitel 5.4) nicht verändert, wird hier auf diese Variation verzichtet.

## 5.3 Eingangsdaten

Alle für die Referenzbrücke berechneten Massen entsprechen den Werten, die auch in der ökobilanziellen Analyse verwendet werden, sodass in alle Nachhaltigkeitsdimensionen übereinstimmende Grunddaten Eingang finden. Die in dem Brückenbauwerk verbauten Stahlträger besitzen eine spezifische zu beschichtende Oberfläche von 11 m<sup>2</sup>/Tonne. Bei der organischen Beschichtung wird davon ausgegangen, dass es sich um ein Korrosionsschutzsystem der Kategorie C3 handelt.

| Variante                               | Mittelwert             | Minimal-/Maximalwert       |
|--|------------------------|----------------------------|
| A: Org. Beschichtung, Herstellung      | 30 EUR/m <sup>2</sup>  | 25/40 EUR/m <sup>2</sup>   |
| B: Feuerverzinkung 300 µm, Herstellung | 24 EUR/m <sup>2</sup>  | 22/26 EUR/m <sup>2</sup>   |
| C: Feuerverzinkung 200 µm, Herstellung | 22 EUR/m <sup>2</sup>  | 21/25 EUR/m <sup>2</sup>   |
| A/C: Org. Beschichtung im Lebenszyklus | 120 EUR/m <sup>2</sup> | 100/170 EUR/m <sup>2</sup> |

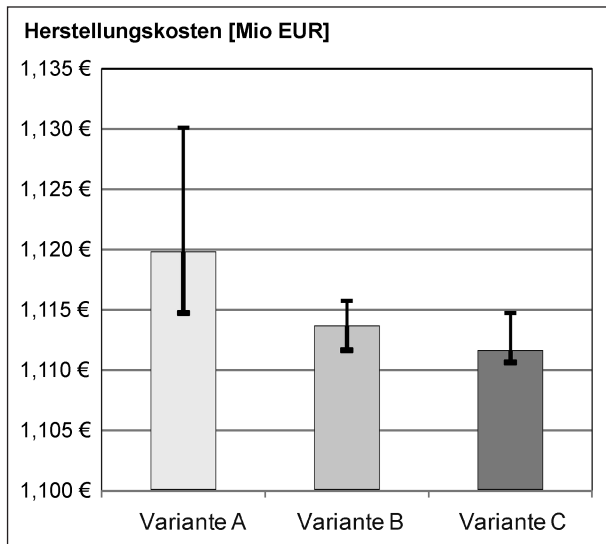
**Tab. 4:** Eingangswerte der Kostenansätze für die organische Korrosionsschutzbeschichtung bzw. die Feuerverzinkung, alle Werte beziehen sich auf einen m<sup>2</sup> beschichteter Fläche

Die Eingangsdaten in Tabelle 4 orientieren sich zum einen an den gesammelten Kostenansätzen im Projekt NaBrü (Literaturwerte, abgerechnete Brückenbauwerke, Submissionsergebnisse) (FOSTA P843 – NaBrü, 2014) sowie zum anderen an der Zusammenstellung in (Bauforumstahl, 2013) für den Verzinkungskostenansatz. Bei der letztgenannten Quelle ist zu beachten, dass sie sich primär auf den Hochbau bezieht und die für das Brückenbauwerk vorliegende spezifische Oberfläche von 11 m<sup>2</sup>/t an der unteren Grenze des angegebenen Bereichs für schwere Profile liegt (10-15 m<sup>2</sup>/t), sodass die dazu passenden höheren Preisansätze verwendet werden.

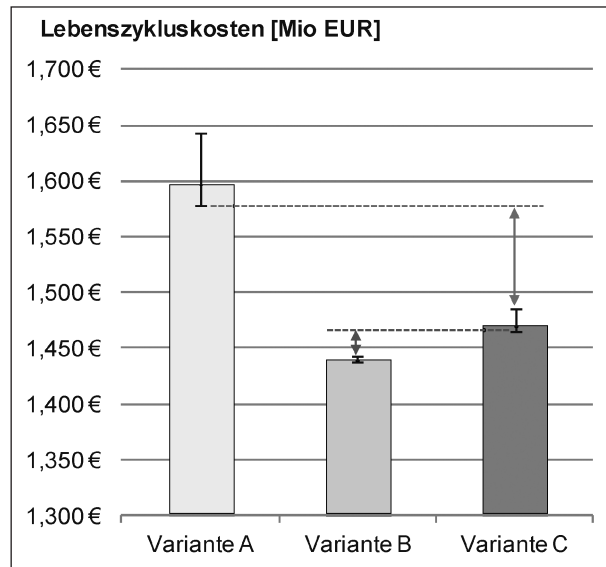
Zusätzlich zu dem direkten Vergleich der Berechnungen unter Verwendung der Mittelwerte wird jeweils eine Analyse mit Minimal- und Maximalwerten durchgeführt, um zum einen die absolute Ergebnisänderung beurteilen zu können und zum anderen den Einfluss auf die Ergebnisreihenfolge des Variantenvergleichs zu untersuchen.

## 5.4 Ergebnisse Lebenszykluskosten

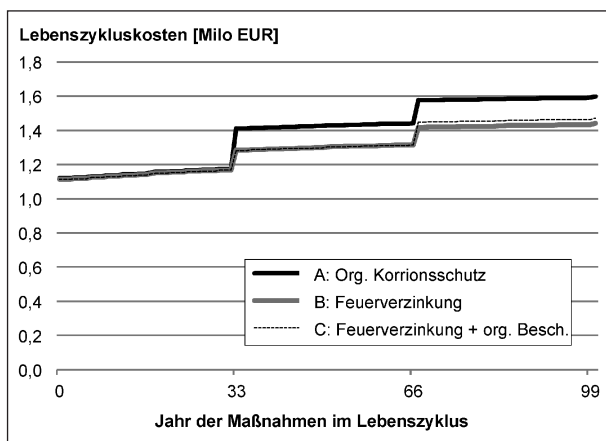
Die Ergebnisse der berechneten Herstellungskosten sind in Bild 18 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bezogen auf die Mittelwerte die Variante B eine Kostenverringerung von 0,5 % und die Variante C eine Kostenverringerung von 0,7 % bezogen auf die Gesamt-Brückenbaukosten der Variante A bedingt. Diese Werte liegen innerhalb der Unsicherheiten der Minimal- und Maximalpreisansätze, sodass mit hoher Wahrscheinlichkeit von einem Herstellungskostenvorteil der feuerverzinkten Varianten B und C ausgegangen werden kann, dieser aber nicht in allen Fällen eintreten muss.



**Bild 18:** Herstellungskosten der untersuchten Varianten unter Angabe der Ergebnisspannbreite bei Verwendung der Minimal- und Maximalkostenansätze aus Tabelle 4



**Bild 20:** Gegenüberstellung der diskontierten Lebenszykluskosten für die untersuchten Varianten unter Verwendung der in Tabelle 4 aufgeführten Minimal- und Maximalkostenansätze sowie unter Berücksichtigung von Verkehrsführungs- und Baustelleneinrichtungskosten



**Bild 19:** Verlauf der diskontierten Lebenszykluskosten für die untersuchten Korrosionsschutzvarianten, alle Werte sind Barwerte

Die Barwerte der Lebenszykluskosten sind in Bild 19 dargestellt. Während der Nutzungsphase entwickeln sich die Vergleichsvarianten gleich, mit Ausnahme der Vollerneuerung der organischen Beschichtung von Variante A im Jahr 33 und 66 sowie der nachträglichen Beschichtung von Variante C im Jahr 66. Diese Maßnahmen verursachen zum einen Kosten für das Aufbringen der organischen Beschichtung selbst, zum anderen erfordern sie zusätzlich das Einrichten einer Verkehrsführung sowie Baustelleneinrichtung. Der absolute Unterschied der Lebenszykluskosten wird daher durch die Maßnahmen selbst und die Folgekosten bestimmt. Als Ergebnis zeigt die Variante B einen Vorteil von 9,8 % und die Variante C einen Vorteil von 7,9 % bezogen auf die Lebenszykluskosten der Variante A. Der vergleichsweise geringe Unterschied

zwischen Variante B und C resultierte aus der notwendigen Betoninstandhaltung im Jahr 66, die parallel zu einer etwaigen Beschichtungsmaßnahme erfolgt und auch das Einrichten einer Verkehrsführung erfordert. Wenn diese Betoninstandsetzung im Jahr 66 nicht stattfinden müsste, würden sich die Lebenszykluskosten von Variante B noch weiter reduzieren.

Die Unsicherheit des Ergebnisses der Lebenszykluskosten unter Berücksichtigung der in Tabelle 4 genannten Spannbreiten der Kostenansätze ist in Bild 20 gezeigt. Die Fehlerindikatoren markieren Minimal- und Maximalergebnisse.

Wenn die Minimalergebnisse von Variante A mit dem Maximalergebnis von Variante C verglichen wird, zeigt sich, dass auch bei Verwendung der angepassten Eingangswerte kein Rangtausch der Varianten stattfindet und Variante B immer einen Lebenszykluskostenvorteil aufweist. Dasselbe gilt für den Vergleich von Variante C und B.

Dazu muss angemerkt werden, dass sich der Abstand der Variantenergebnisse verkleinern wird, wenn die Kostenansätze für Verkehrsführung, Gerüsterstellung und -vorhaltung und Baustelleneinrichtung gesenkt werden. Dieser Einfluss wird hier nicht quantitativ untersucht, allerdings kann davon ausgegangen werden, dass auch ein Minimalkostenansatz für die oben genannten Kostenstellen nicht zu einem Rangtausch der Varianten führen wird.

## 6 Externe Effekte

### 6.1 Grundlagen

Externe Effekte bezeichnen einen Zusammenhang in Volkswirtschaften, bei dem Handlungen eines Wirtschaftssubjekts andere einzelne Personen oder Personengruppen beeinflussen. Als Beispiel kann der Bau einer Brücke über eine bestehende Autobahn genannt werden, der zu einer Behinderung von Verkehrsteilnehmern führt, die sich in verlängerten Fahrzeiten und erhöhten Schadstoffausstößen durch Stop&Go-Fahrweise ausdrückt. Die vermehrten Schadstoffe führen dann wiederum zu einer Beeinträchtigung der Allgemeinheit, z. B. in Form von schlechter Luftqualität mit Gesundheitsschädigungen und einer schnelleren Degradation an Gebäuden. Werden diese Effekte in Geldeinheiten übersetzt (monetarisiert), sind externe Kosten das Resultat (ZINKE, et al., 2012).

Eine weitere Möglichkeit ist die Integration von externen Effekten in die Ökobilanz. Dazu werden die Umweltwirkungen, die nicht direkt durch die verwendeten Baustoffe, ihre Herstellung oder ihren Transport sondern durch die Beeinflussung der Verkehrsteilnehmer bedingt werden, in die ökobilanziellen Berechnungen integriert, vergleiche hierzu Kapitel 4.

In diesem Projekt werden beide Wege verwendet. Die Emissionen aus den geänderten Geschwindigkeiten des Verkehrs und die dadurch sich ergebende Veränderung der Schadstoffausstöße und Treibstoffverbräuche werden in die Ökobilanz integriert. Dabei können je nach Wirkungskategorie durch die veränderten Fahrgeschwindigkeiten sowohl positive externen Effekten (d. h. einer Verringerung der Auswirkungen) als auch negative externen Effekten (erhöhte Auswirkungen) auftreten.

Die Effekte der zusätzlichen Fahrzeugbetriebskosten und Verspätungskosten (auch bezeichnet als Nutzerkosten) werden in externen Kosten ausgedrückt. Aspekte, die in Zusammenhang mit Unfällen stehen, werden nicht in die Analysen integriert. In der Fachliteratur gibt es derzeit zwar Bewertungsansätze, die es erlauben, die reduzierten Unfallkostenraten von Abschnitten mit Baustellen im Vergleich zwischen zu freien Fahrstrecken zu quantifizieren (SÜMMERMANN, 2012) (BAKABA, et al., 2012), allerdings haben Unfälle im Baustellenbereich eine sehr viel größere Reduktion der Grenzkapazität zur Folge als Autobahnen mit Seitenstreifen. Diese wechselseitigen Abhängigkeiten

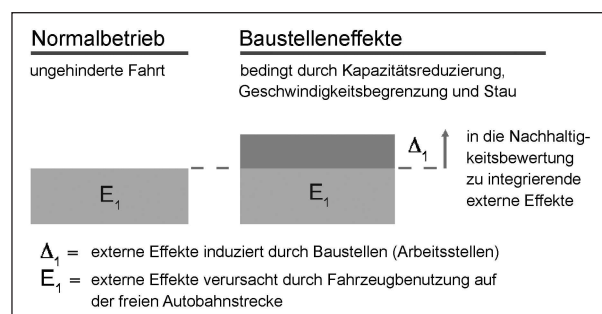
lassen sich nur mit sehr großen Unsicherheiten in externen Kosten abbilden und werden daher für die hier durchgeführten Analysen ausgeklammert.

### 6.2 Systemgrenzen

Als zeitliche Systemgrenze wird der Lebenszyklus einer Brücke von 100 Jahren analog zu den in Deutschland existierenden Ansätzen gewählt. Auswirkungen aus der Herstellung und dem Rückbau werden in die Analysen integriert.

Als räumliche Systemgrenze werden die innerhalb des Lebenszyklus anfallenden externen Effekte des unten liegenden Sachverhalts (Autobahn) vollständig berechnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass es sich um eine Ersatzbaumaßnahme handelt. Wenn das Bauwerk auf der grünen Wiese errichtet werden würde, könnten die Auswirkungen in der Herstellungsphase zu null gesetzt werden, eine Änderung in den übrigen Lebenszyklusphasen erfolgte nicht. Für den oben liegenden Sachverhalt (Bundesstraße bzw. Landstraße) werden keine Berechnungen der externen Effekte vorgenommen, da die dort entstehenden Effekte nicht durch die drei verschiedenen Untersuchungsvarianten verändert werden.

Die externen Effekte werden analog zu Bild 21 als Differenzwerte zum Normalbetrieb ausgewiesen. Hierdurch werden nur die durch die Baustellen induzierten Effekte erfasst. Hintergrund ist, dass die im Normalbetrieb entstehenden externen Effekte nicht dem einzelnen Bauwerk angelastet werden können, sondern dem Mobilitätsbedürfnis der Nutzer bzw. dem Warentransport zugeordnet werden sollten. In diesem Zusammenhang spielen Fragestellungen wie die Internalisierung durch Besteuerung von Treibstoffen oder die Einführung von Mautsystemen eine wichtige Rolle, auf die nicht weiter eingegangen wird.



**Bild 21:** Abgrenzung der in die Nachhaltigkeitsanalysen zu integrierenden externen Effekte

### 6.3 Eingangsdaten

Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, basieren die zur Berechnung der externen Effekte durchgeführten Analysen auf Vorarbeiten, die im Forschungsprojekt NaBrü entwickelt wurden (FOSTA P843 – NaBrü, 2014). Die grundlegenden Ansätze gehen auf (RESSEL, 1994) zurück, dessen makroskopisches, deterministisches Verkehrsmodell für die im Folgenden dargestellten Analysen ergänzt und den Randbedingungen der Nachhaltigkeitsbewertung von Brückenbauwerken angepasst wurde. Dabei wurden insbesondere die in (HELLMAN, et al., 2008) und (BECKMANN & ZACKOR, 2001) dargestellten Modellerweiterungen berücksichtigt. Eine detaillierte Beschreibung des Berechnungsmodells ist in (ZINKE, 2014) zu finden.

Zur Berechnung der durch die Baumaßnahmen bedingten Verkehrsbehinderungen und zur Bestimmung der daraus entstehenden externen Effekte ist die Definition der Verkehrsbelastung notwendig. Das durchschnittliche tägliche Verkehrsaufkommen (DTV) wird mit 60.000 Kraftfahrzeugen abgeschätzt. Darüber hinaus wird ein Schwerverkehrsanteil von 10 % angenommen. Das Berechnungsmodell verwendet für Pkw die standardisierten Ganglinien aus (PINKOFSKY, 2006). Hierdurch wird gewährleistet, dass externe Effekte auf Grundlage aktueller Erkenntnisse und in Übereinstimmung mit der im Rahmen des Pavement-Management-Systems (PMS) etablierten Methode berechnet werden.

Alle Eingangswerte für den unten liegenden Sachverhalt der Autobahn sind in Tabelle 5 dargestellt. Mit der Jahresganglinie B ist eine Ganglinie gewählt worden, die weitgehend ausgeglichenen Verkehr im Jahresverlauf abbildet. Die Wochenganglinie B stellt nach (PINKOFSKY, 2006) die am häufigsten auftretende Ganglinie für Autobahnen dar. Für die Tagesganglinien in der Woche ist in Fahrrichtung mit der Ganglinie B eine Morgenspitze abgebildet worden, in Gegenrichtung mit der Ganglinie E eine Nachmittagspitze. Am Wochenende stellen die verwendeten Ganglinien am Samstag einen ausgeglichenen Tagesgang (Ganglinie A) bzw. eine breite Nachmittagspitze (Ganglinie D) dar, am Sonntag eine Abendspitze (Ganglinie D) bzw. eine Mittagspitze (Ganglinie B). Die Pkw-Tagesganglinien für die Wochentage und Sonntage sind beispielhaft in Bild 22 dargestellt. Für den Schwerverkehr existieren derzeit keine aktuellen Verkehrsganglinien, daher werden die in (SCHMUCK, 1987) genannten

(allerdings sehr alten) Ganglinien analog zu den Empfehlungen in (HELLMAN, et al., 2008) verwendet.

In Ergänzung zu den Verkehrsbelastungen sind die Dauern und zugehörigen Verkehrsführungen für die einzelnen Baumaßnahmen zu definieren. Um eine möglichst objektive Bewertungsgrundlage zu erreichen, erfolgt die Bestimmung dieser Parameter größtenteils auf Grundlage des Bauzeitenkatalogs (BMVBS, 2009) und bei fehlenden Prozessschritten auf Grundlage der im Forschungsprojekt NaBrü untersuchten Referenzbrücken (FOSTA P843 –

| Aspekt                                   | Fahrtrichtung    | Gegenrichtung |
|--|------------------|---------------|
| Typ                                      | Autobahn         | Autobahn      |
| Sachverhalt                              | unten liegend    | unten liegend |
| DTV [Kfz/Tag]                            | 60.000           |               |
| Schwerverkehr                            | 10 % (6.000 Kfz) |               |
| Geschwindigkeitsbegrenzung freie Strecke | keine            |               |
| Geschwindigkeitsbegrenzung Baustelle     | 80 km/h          |               |
| Spuren                                   | 2                | 2             |
| Jahresganglinie                          | B                |               |
| Wochenganglinie                          | B                | B             |
| Tagesganglinie Mo-Fr                     | B                | E             |
| Tagesganglinie Sa                        | A                | D             |
| Tagesganglinie So                        | D                | B             |

Tab. 5: Eingangsdaten für die Verkehrsbelastung und Verkehrsganglinien

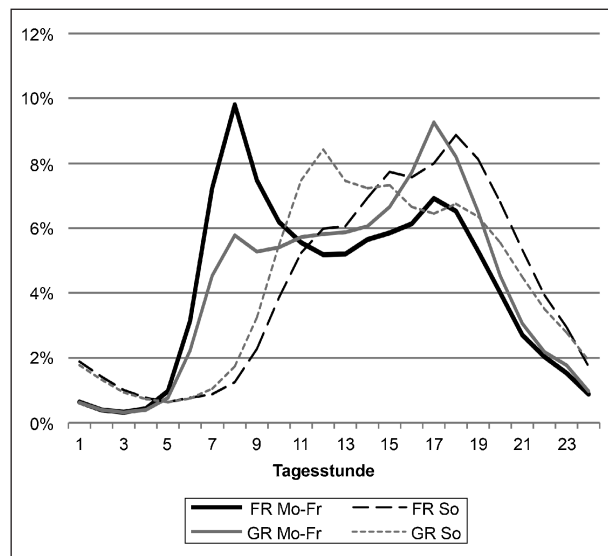


Bild 22: Pkw-Tagesganglinien für die Fahrtrichtung (FR) und die Gegenrichtung (GR) der Tage Montag bis Freitag sowie Sonntag nach (PINKOFSKY, 2006)

NaBrü, 2014). Im Bauzeitenkatalog sind für einzelne Baumaßnahmen unter Berücksichtigung einer gegebenen Verkehrsführung die Grunddauern der Prozesse aufgeschlüsselt. Diese Dauern geben eine minimale Ausführungszeit an, die in Abhängigkeit von jahreszeitlich variierenden Tageslicht- und Schlechtwetterfaktoren erhöht werden. Hier wird ausschließlich der Grundwert verwendet, um damit einen unteren Grenzwert der externen Effekte abzubilden. Bei jahreszeitlich abhängiger Verlängerung der Bauzeiten erhöhen sich auch die Auswirkungen der externen Effekte aus der Verkehrsbeeinflussung.

Das komplette Baumaßnahmenzenario im Lebenszyklus ist für die Untersuchungsvariante A in Tabelle 6 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass auf Grundlage der Dauern der Baumaßnahmen die Zeit für die Dauer bei paralleler Bearbeitung bestimmt wird, um die Baupraxis abzubilden. Diese Zeiten der Parallelaktivitäten in Wochen dienen als Eingangswert für die makroskopischen, deterministischen Verkehrsmodellierungen.

Die zu untersuchenden Ausführungsvarianten unterscheiden sich lediglich in den Instandsetzungsmaßnahmen in den Jahren 33 und 66 im Lebenszyklus. Daher sind in Tabelle 7 die jeweiligen Ansätze für den Variantenvergleich zusammengestellt. Es ist ersichtlich, dass sich sowohl in der Verkehrsführung als auch in den Ausführungsdauern Unterschiede ergeben. Da hier eine zustandsbestimmende Instandhaltungsstrategie zugrunde gelegt ist, die zur Reduzierung der Bauwerkseingriffe eine Maßnahmenbündelung vornimmt, können die Maßnahmen nicht unabhängig voneinander betrachtet werden. Daher wird in Tabelle 7 zusätzlich die Betoninstandsetzung aufgeführt, die im Jahr 66 zusammen mit den Korrosionsschutzmaßnahmen durchgeführt wird. Da im Rahmen einer alleinigen Betoninstandsetzung nur eine lokale Ausbesserung stattfindet, wird in dem angesetzten Szenario davon ausgegangen, dass die Verkehrseinschränkung im Vergleich zu der mit der Vollerneuerung des Korrosionsschutzsystems kombinierten Maßnahme etwas geringer ist. Dieser Sachverhalt wird durch die Verwendung einer „3+1“-Verkehrsführung abgebildet, deren Grenzkapazität (maximaler Verkehrsdurchfluss ohne Staubbildung) im Vergleich zu einer „4+0“-Führung geringfügig größer ist.

Als Monetarisierungsansätze werden Mittelwerte aus verschiedenen Quellen verwendet. Die Treibstoffkosten sind Mittelwerte des Jahres 2012. Die

| Jahr | Einzelmaßnahme                   | Ansatz (Tage) | Zeit Parallelaktivitäten (Wochen) | Verkehrsführung AB |
|------|----------------------------------|---------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0    | Herstellung                      | -             | 22                                | 2+2                |
| 17   | Deckschicht Fahrbahn             | 2             | 0,5                               | 2n+2n              |
| 33   | Verkehrsführung                  | 2             | 9                                 | 2n+2n              |
|      | Erneuerung Kappen                | 26            |                                   |                    |
|      | Austausch Schutzeinrichtungen    |               |                                   |                    |
|      | Austausch Deckschicht/Abdichtung | 12            | 5                                 | 4s+0               |
|      | Austausch Entwässerung           | 4,5           |                                   |                    |
|      | Korrosionsschutz Vollerneuerung  | 15            |                                   |                    |
|      | Verkehrsführung                  | 10            |                                   |                    |
| 50   | Deckschicht Fahrbahn             | 2             | 0,5                               | 2n+2n              |
| 66   | Verkehrsführung                  | 2             | 10                                | 2n+2n              |
|      | Erneuerung Kappen                | 26            |                                   |                    |
|      | Austausch Schutzeinrichtungen    |               |                                   |                    |
|      | Austausch Deckschicht/Abdichtung | 16            | 7                                 | 4s+0               |
|      | Austausch Entwässerung           | 4,5           |                                   |                    |
|      | Verkehrsführung                  | 10            |                                   |                    |
|      | Betoninstandsetzung Überbau      | 10            |                                   |                    |
|      | Korrosionsschutz Vollerneuerung  | 15            | 3                                 | 2+2                |
|      | Betoninstandsetzung Widerlager   | 12            |                                   |                    |
| 83   | Deckschicht Fahrbahn             | 2             | 0,5                               | 2n+2n              |
| 100  | Rückbau                          | 10            | 2                                 | 2+2 <sup>#</sup>   |

# zusätzlich Sperrung für ein Wochenende  
n keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung  
s Benützung des Seitenstreifens

Tab. 6: Lebenszyklusszenario für die Variante A (organische Beschichtung) mit Bauzeitenermittlung und Verkehrsführung

| Variante  | Jahr 33        | Jahr 66                                     |
|---|----------------|---|
| A: Organisches Beschichtungssystem                    | Vollerneuerung | Vollerneuerung, zus. Betoninstandsetzung    |
|   | 5 Wochen       | 7 Wochen                                    |
|   | 4s+0           | 4s+0  |
| B: Feuerverzinkung 300 µm                             | Keine          | Betoninstandsetzung                         |
|   |                | 4 Wochen                                    |
|   |                | 3s+1  |
| C: Feuerverzinkung 200 µm und organische Beschichtung | Keine          | Org. Beschichtung, zus. Betoninstandsetzung |
|   |                | 7 Wochen                                    |
|   |                | 4s+0  |

Tab. 7: Maßnahmenunterschiede der Varianten A, B und C in den Jahren 33 und 66; im Jahr 66 sind zusätzlich Maßnahmen der Betoninstandsetzung aufgeführt, da diese in Abstimmung mit den Korrosionsschutzmaßnahmen durchgeführt werden

kilometerabhängigen Betriebskosten basieren auf Kennzahlen des (ADAC, 2013) und einer Studie von (Rhenus-Logistics, 2003). Die Kostensätze zur Monetarisierung der Zeitverluste stammen aus der europäischen Studie IMPACT (MAIBACH, et al., 2008). Alle Ansätze sind auf das Jahr 2012 bezogen in Tabelle 8 zusammengefasst.



| Variante                | Ansatz Pkw         | Ansatz Lkw  |
|-------------------------|--------------------|-------------|
| Treibstoffkosten        | Benzin: 1,64 EUR/l |             |
|                         | Diesel: 1,49 EUR/l |             |
| Zeitverluste            | 18,65 EUR/h        | 40,00 EUR/h |
| Betriebskosten Fahrzeug | 0,28 EUR/km        | 0,86 EUR/km |

Tab. 8: Monetarisierungsansätze zur Berechnung der externen Kosten auf Grundlage der oben genannten Studien und Beispielrechnungen, alle Werte sind auf das Jahr 2012 bezogen

### 6.4 Externe Kosten

Die Berechnung der externen Kosten zeigt, dass es aufgrund der gewählten Verkehrsführungen 4s+0 sowie 3s+1 beim unten liegenden Sachverhalt zu keinen nennenswerten Stauereignissen kommt, da die Grenzkapazität der Autobahn durch die Baustellen nur leicht herabgesetzt wird. Die externen Kosten werden durch die Zeitkosten dominiert, die durch das langsamere Passieren des Baustellenbereichs im Vergleich zur unbehinderten Fahrt entstehen (Geschwindigkeitsbegrenzung auf 80 km/h im Baustelleninnenbereich). Die erhöhten Betriebskosten spielen eine untergeordnete Rolle.

Die Ergebnisse für die Variante A (organisches Beschichtungssystem) sind in Bild 23 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Phase der Bauwerkserrichtung für 54 % der externen Kosten verantwortlich ist, während die Instandhaltungsmaßnahmen im Betrieb 37 % ausmachen und der Rückbau 9 %.

Ein anderes Bild ergibt sich für die Variante B, Feuerverzinkung mit einer Schichtdicke von 300 µm, siehe Bild 24. Hier verantworten die Instandhaltungsmaßnahmen im Betrieb nur 21 % der externen Gesamtkosten, da im Lebenszyklus eine Eingriffsminimierung stattfindet. Die absoluten Zahlen in der Herstellungs- und Rückbauphase bleiben identisch, da sich hier im Vergleich zu der Variante mit der organischen Korrosionsschutzbeschichtung keine Änderungen in den Bauzeiten oder Verkehrsführungen ergeben.

Die externen Gesamtkosten der Variante C liegen durch das Aufbringen der organischen Beschichtung im Jahr 66 zwischen den beiden Varianten A und B. Hier ergeben sich in der Betriebsphase externe Kosten von insgesamt einer Million EUR, siehe Bild 25. Die absoluten externen Herstellungs- und Rückbaukosten bleiben wiederum gleich.

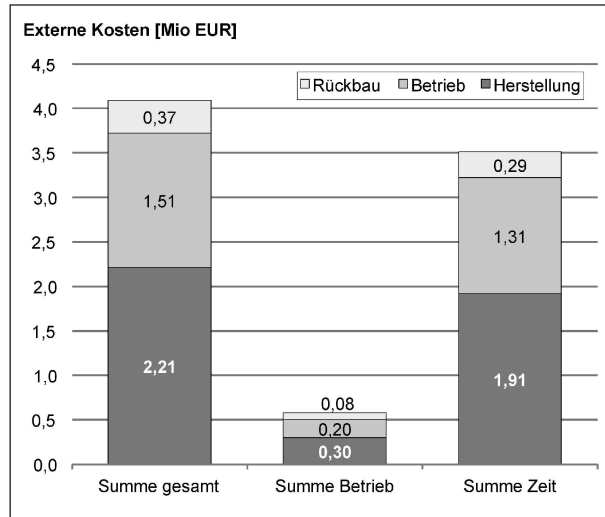


Bild 23: Externe Kosten für den gesamten Lebenszyklus der Variante A, aufgeteilt nach Betriebskosten der Fahrzeuge und Zeitkosten, die sich aus verlängerten Fahrzeiten errechnen

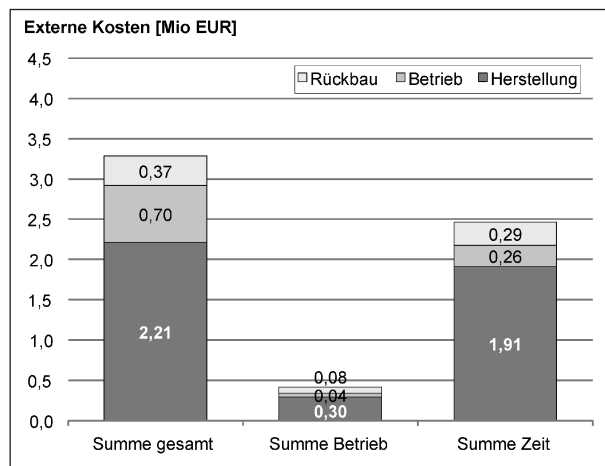


Bild 24: Externe Kosten für den gesamten Lebenszyklus der Variante B, aufgeteilt nach Betriebskosten der Fahrzeuge und Zeitkosten

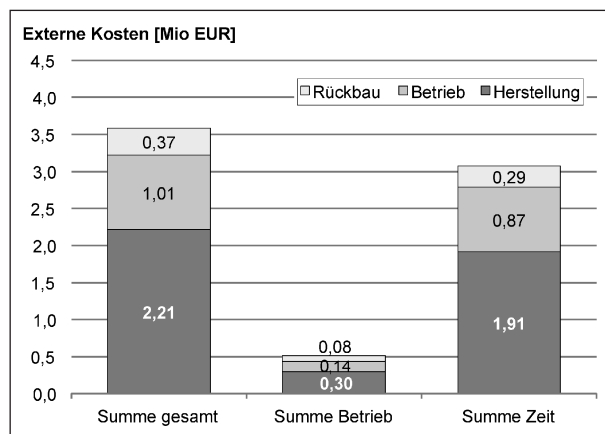


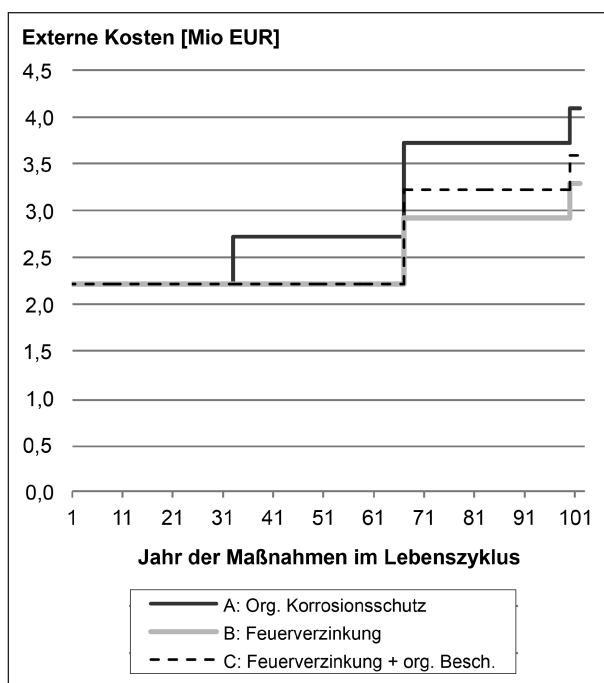
Bild 25: Externe Kosten für den gesamten Lebenszyklus der Variante C, aufgeteilt nach Betriebskosten der Fahrzeuge und Zeitkosten

## 6.5 Zusammenfassung – Externe Kosten

Zusammengefasst sind die Ergebnisse in Bild 26. Hier sind die entstehenden externen Kosten über den Lebenszyklus aufgetragen, sodass jeweils der Entstehungszeitpunkt erkennbar ist. Vor allem im Jahr 66 des Lebenszyklus ergeben sich Unterschiede. Die Entstehung der externen Kosten in Höhe von ca. 0,7 Mio. EUR bei der Variante B (nur Feuerverzinkung) entsteht durch die notwendigen Betoninstandsetzungsmaßnahmen am Überbau und wird nicht durch die Stahlträger verursacht. Insgesamt ergibt sich ein Vorteil für Variante B von 20 % und für Variante C von 12 % bezogen auf die gesamten externen Kosten der Variante A.

Die Art der Verkehrsführung hat auf die Ergebnishöhe einen sehr geringen Einfluss, solange kein Wegfall einer Fahrspur erfolgt. Bei einer Führung von  $2n+1$  oder  $3s+0$  wäre eine Erhöhung der externen Kosten um den Faktor 10 die Folge, da durch die Kapazitätsreduzierung (in eine Fahrtrichtung existiert nur eine Fahrspur) maßgebende Stauereignisse auftreten würden. Da alle Varianten unterschiedliche Bauzeiten in der Betriebsphase bedingen, würde damit auch die Differenz der externen Gesamtkosten deutlich zunehmen.

Ein geringerer DTV würde zu insgesamt niedrigeren externen Kosten führen. Gleichzeitig nähern



**Bild 26:** Externe Kosten über den gesamten Lebenszyklus für die drei Varianten

sich die Ergebnisse der Varianten an und der absolute und relative Abstand der externen Gesamtkosten würde kleiner werden. Die Reihenfolge der Ergebnisse bliebe dieselbe.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

Am Beispiel einer real ausgeführten Verbundbrücke als Referenzbauwerk wurden im Rahmen einer Nachhaltigkeitsanalyse drei Varianten des Korrosionsschutzes untersucht. Über den gesamten Lebenszyklus dieser integralen Autobahnüberführung wurde eine Ökobilanz erstellt, die Lebenszykluskosten sowie die externen Effekten ermittelt und für die drei Varianten verglichen.

Die in Kapitel 4 beschriebene ökologische Analyse zeigt in allen betrachteten Wirkungskategorien Einsparungen durch die Feuerverzinkung über den gesamten Lebenszyklus im Vergleich zur organischen Beschichtung. Für den Prozess der Feuerverzinkung in der Herstellung ergeben sich nicht vernachlässigbare Umweltwirkungen, die jedoch durch Einsparungen während der Nutzungsphase kompensiert werden.

Die Ergebnisse der Berechnungen der Lebenszykluskosten in Kapitel 5 zeigen, dass sich bereits für die Herstellungskosten eine Reduzierung durch den Einsatz einer Feuerverzinkung ergibt. Darüber hinaus führt die Reduzierung von Instandsetzungsmaßnahmen während der Nutzungsphase zu insgesamt geringeren Lebenszykluskosten und somit zu der Feuerverzinkung als die kostengünstigste Variante.

Die externen Effekte wurden einerseits, vergleiche Kapitel 4.4, in die Ökobilanz integriert (Umwelt Effekte) und andererseits über einen Monetarisierungsansatz als externe Kosten ausgewiesen (Fahrzeugbetriebskosten und Verspätungskosten), vergleiche Kapitel 6.4. Die durch Baumaßnahmen verursachten Eingriffe in den Verkehr (geänderte Geschwindigkeiten) lassen Schadstoffausstöße und Treibstoffverbräuche entstehen. Diese Emissionen verursachen für die hier untersuchten Varianten Umweltwirkungen, die in der Größenordnung der Emissionen des Brückenbauwerks bzw. auch darüber liegen. Bei der Berechnung von Fahrzeugbetriebskosten und Verspätungskosten über-

steigen auch diese externen Kosten die Lebenszykluskosten des Brückenbauwerks in allen Varianten. Variante B der Feuerverzinkung, gefolgt von Variante C, führt zu reduzierten externen Effekten im Vergleich zu einer mit organischer Beschichtung ausgeführten Referenzbrücke der Variante A.

Zusammenfassend ergibt sich für die hier untersuchte Brücke die Variante B als die beste Lösung. Da es sich um eine Untersuchung an einer Referenzbrücke handelt, sind jedoch die Ergebnisse im Einzelnen nicht unbedingt auf Brücken mit anderen Randbedingungen übertragbar.

## 7.2 Ausblick

Der im Vergleich zu einer organisch beschichteten Brücke veränderte Bauablauf einer feuerverzinkten Brücke ist für detailliertere Untersuchungen von besonderem Interesse. In diesem Projekt wurde in Absprache mit der BAST eine vollständige Feuerverzinkung im Werk untersucht und davon ausgegangen, dass eine fehlerfreie Verarbeitung auch auf der Baustelle stattfindet und somit keine Reparaturmaßnahmen in situ vorzunehmen sind. Da jedoch die Bauteile durch die Zinkbäder in ihrer Länge beschränkt sind, sind für Brücken mittlerer Spannweite Bauteilstöße unumgänglich. Um den Korrosionsschutz sicherzustellen, sind vor Ort Spritzverzinkungen durchzuführen und in die Nachhaltigkeitsanalysen zu integrieren. Die an einem solchen Stoß erforderlichen Bau- und Instandsetzungsmaßnahmen sind dann sowohl in der Ökobilanz als auch für Lebenszykluskosten und den externen Effekten zu berücksichtigen. Es sollten somit ergänzende und detailliertere Untersuchungen durchgeführt werden, um eine realitätsgetreue Abbildung von feuerverzinkten Brückenbauwerken zu ermöglichen und die spezifischen konstruktiven Besonderheiten abzubilden.

Die Schutzdauer des Stahltragwerks gegen Korrosion ist von entscheidender Wichtigkeit in der Nutzungsphase einer Brücke. Da es sich hierbei um eine Zeitspanne von 100 Jahren handelt, ist ggf. auch mit Reparatur- bzw. Sanierungsmaßnahmen zu rechnen. Bei den hier durchgeführten Untersuchungen in Variante B wurde von einer fehlerfreien Aufrechterhaltung des Schutzes durch die Feuerverzinkung ausgegangen. Sollte dies jedoch nicht eintreten, sind auch hier weitere diese Aspekte beinhaltende Untersuchungen anzustellen. Dabei sind die den Korrosionsschutz betreffenden Maß-

nahmen nicht isoliert zu betrachten, sondern ggf. in eine Instandsetzungsstrategie einzuordnen. Neben der hier betrachteten zustandsbestimmenden Strategie kann so eine Strategie z. B. einen möglichst optimalen Erhalt des Brückenzustands durch den Eingriff mit vielen kleinen Maßnahmen beinhalten oder auch eine gezielte Alterung durch wenig Instandsetzungen bedeuten. Je nach Instandhaltungsstrategie sind die durch den Korrosionsschutz hervorgerufenen Einflüsse unterschiedlich.

Da jede Brücke durch ihren individuellen Standort und somit nicht nur durch den vorhandenen Baugrund sondern stark durch die Einbindung in ein Verkehrsnetz, charakterisiert ist, sind die hier durchgeführten Untersuchungen nicht ohne weiteres allgemeingültig und auf andere Brücken übertragbar. Ziel war es, einen Variantenvergleich für die hier gewählte Referenzbrücke über eine Autobahn mit insgesamt vier Richtungsfahrbahnen durchzuführen. Die Untersuchung weiterer Standortsituationen, z. B. bei verändertem DTV oder einer dreispurigen Autobahn, bedingt eine Veränderung der absoluten Ergebnisse vor allem der externen Effekte und kann zu einer veränderten Reihenfolge der untersuchten Varianten führen. Auch können durch einen veränderten Brückenstandort sich Randbedingungen für die Herstellungs- und Errichtungsphase ergeben, die die Ergebnisse des Variantenvergleichs beeinflussen und zu berücksichtigen sind.

Die Untersuchungen am Referenzbauwerk zeigen, dass anfängliche Maßnahmen wie z. B. eine Feuerverzinkung auf die lange Nutzungsphase von Brückenbauwerken einen vergleichsweise großen Effekt haben können. Es lohnt sich also für das Einzelobjekt mit den jeweiligen Randbedingungen detaillierte Analysen über die gesamte Lebensdauer durchzuführen. Die hier durchgeführten Untersuchungen können dafür eine Art Mustervorgehen sein.

## 8 Danksagung

Das Forschungsprojekt „Untersuchung zur Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken“ (FE 89.0291/2013) wurde im Namen des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) erarbeitet. Herr Rogalski hat im Namen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) die Arbeiten fachlich und organisatorisch be-

gleitet. Die Autoren danken der BAST und dem BMVBS für die Unterstützung.

Ein besonderer Dank gilt dem Projektteam des Forschungsprojekts NaBrü.

## 9 Literatur

- ADAC (2013): ADAC Autokosten 2013. Online: [http://www.adac.de/\\_mmm/pdf/autokostenuebersicht\\_s-v\\_47089.pdf](http://www.adac.de/_mmm/pdf/autokostenuebersicht_s-v_47089.pdf), Zugriff am 10. Februar 2014
- BAKABA, J. E. et al. (2012): Untersuchung der Verkehrssicherheit im Bereich von Baustellen auf Bundesautobahnen. GDV: Forschungsbericht VI 04
- BAST (Dez. 2012): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten ZTV-Ing. – Teil 4 Stahlbau, Stahlverbundbau. Abschnitt 3, Korrosionsschutz von Stahlbauten, Bergisch Gladbach, Bundesanstalt für Straßenwesen
- BAUFORUMSTAHL (2013): Kosten im Stahlbau 2013 – Basisinformation zur Kalkulation. Düsseldorf: bauforumstahl
- BECKMANN, A. & ZACKOR, H. (2001): Untersuchung und Eichung von Verfahren zur aktuellen Abschätzung von Staudauer und Staulängen infolge von Tages- und Dauerbaustellen auf Autobahnen, Bonn: Bundesministerium für Verkehr Bau- und Wohnungswesen Abt. Straßenbau Straßenverkehr, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 808
- BECK, T. et al. (2013): Instandhaltungsstrategien als Basis für die ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundbrücken nach Kriterien der Nachhaltigkeit. Stahlbau, 82 (1), S. 3-10
- BECK, T., FISCHER, M. & PFAFFINGER, M. (2011): Life Cycle Assessment for representative steel and composite bridges. In: F. BIONDINI & D. FRANGOPOL, Hrsg. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. Stresa, Italien: Taylor & Francis, S. 357
- BMVBS (2004): Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken, Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
- BMVBS (2009): Bauzeitenkatalog zur Erstellung von Rahmenterminplänen für Erhaltungsmaßnahmen bei Autobahnen. Bonn: Arbeitsgruppe „Bauzeitenverkürzung“
- DIN EN 15978 (2012): Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode, Berlin: Deutsches Institut für Normung
- DIN EN ISO 12944-2 (1998): Beschichtungsstoffe – Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme. Teil 2: Einteilung der Umgebungsbedingungen, Berlin: Deutsches Institut für Normung
- DIN EN ISO 12944-5 (2008): Beschichtungsstoffe – Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme. Teil 5: Beschichtungssysteme, 2008: Deutsches Institut für Normung
- DIN EN ISO 1461 (2009): Durch Feuerverzinken auf Stahl aufgebrauchte Zinküberzüge (Stückverzinken) – Anforderungen und Prüfungen, Berlin: Deutsches Institut für Normung
- FOGIB (1997): Ingenieurbauten – Wege zu einer ganzheitlichen Bewertung. Stuttgart: Universität Stuttgart. Abschlussbericht der DFG-Forschergemeinschaft Ingenieurbauten, Band 1-3
- FOSTA P835 (2014): Feuerverzinken im Stahl- und Verbundbrückenbau, Düsseldorf: Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.
- FOSTA P843 – NaBrü (2014): Ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundbrücken nach Kriterien der Nachhaltigkeit, Düsseldorf: Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.
- FRIEDRICH, H. et al. (2013): Nachhaltigkeitsanalyse von Verbundstraßenbrücken am Beispiel einer Autobahnüberführung. Bauingenieur VDI-Bautechnik, Jahresausgabe 2013/2014, S. 111-119
- GRAUBNER, C.-A. et al. (2010): Nachhaltigkeitsbewertung für die Verkehrsinfrastruktur. Bauingenieur, 85, S. 331-340
- HELLMAN, L., RÜBENSAM, J. & SCHWIETHAL, S. (2008): Entwicklung von Verfahrenshilfen zur Berücksichtigung baustellenbedingter Nutzerkosten im Erhaltungsmanagement, Bonn:

- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr
- Institut Bauen und Umwelt e. V. (2013): Umwelt-Produktdeklaration: Feuerverzinkte Baustähle: Offene Walzprofile und Grobbleche, Berlin: Institut Bauen und Umwelt e. V. (IBU)
- Institut Feuerverzinken (2013a): 50 Jahr und mehr – Umweltmundesamt liefert Daten zur Bestimmung der Schutzdauer einer Feuerverzinkung. Online: [www.feuverzinken.com](http://www.feuverzinken.com), Zugriff am 14. Oktober 2013
- Institut Feuerverzinken (2013b): Korrosionsschutz durch Duplex-Systeme (Feuerverzinken + Beschichten) mit Verbände-Richtlinie Duplex-Systeme. Online: [www.feuverzinken.com](http://www.feuverzinken.com), Zugriff am 14 Oktober 2013
- KUHLMANN, U. et al. (2011): Ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundbrücken nach Kriterien der Nachhaltigkeit. *Stahlbau*, 80 (10), S. 703-710
- MAIBACH, M. et al. (2008): Handbook on estimation of external costs in the transport sector. CE Delft: Publication number: 07.4288.52
- MAIER, P. et al. (2011): German approach to a holistic assessment of steel and composite bridges. In: F. BIONDINI & D. FRANGOPOL, Hrsg. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. Stresa, Italien: Taylor & Francis, S. 363
- Merkblatt 405 (2005): Korrosionsschutz von Stahlkonstruktionen durch Beschichtungssysteme, Düsseldorf: Stahl-Informationszentrum
- PINKOFSKY, L. (2006): Typisierung von Ganglinien der Verkehrssärke und ihre Eignung zur Modellierung der Verkehrsnachfrage, Braunschweig: Technische Universität Braunschweig
- RESSEL, W. (1994): Untersuchungen zum Verkehrsablauf im Bereich der Leistungsfähigkeit an Baustellen auf Autobahnen. München-Neubiberg: Univ. d. Bundeswehr
- Rhenus-Logistics (2003): Lkw-Kalkulation. Online: <http://www.wsa-s.wsv.de/downloadbereich>, Zugriff am 10. Februar 2014
- SCHMUCK, A. (1987): Straßenerhaltung mit System. Grundlagen des Managements. Bonn: Kirschbaum
- Schweizerisches Fachstelle Feuerverzinken (2013): Stahlbrücken. Online: <http://www.verzinkereien.info/sff/templates/index.php?pid=stahlbruecken>, Zugriff am 14. Oktober 2013
- SÜMMERMANN, A. (2012): Verkehrssicherheits- und Verkehrsablaufuntersuchungen in Arbeitsstellen längerer Dauer auf Autobahnen in Deutschland. RWTH Aachen: Dissertation
- ZINKE, T. (2014): Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauwerken – Ganzheitliche Bewertung von Autobahnbrücken unter besonderer Berücksichtigung externer Effekte. Karlsruhe: noch nicht veröffentlichte Dissertation
- ZINKE, T., SCHMIDT-THRÖ, G. & UMMENHOFER, T. (2012): Entwicklung und Verwendung von externen Kosten für die Nachhaltigkeitsbewertung von Verkehrsinfrastruktur. *Beton- und Stahlbetonbau*, 107 (8), S. 523-532
- ZINKE, T., UMMENHOFER, T., PFAFFINGER, M. & MENSINGER, M. (2011): The social dimension on bridge sustainability assessment – Impacts on users and the public. In: F. BIONDINI & D. FRANGOPOL, Hrsg. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. Stresa, Italien: Taylor & Francis, S. 365

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

## 2008

- B 59: Bandverzinkte Schutzplankenholme  
Schröder € 12,50
- B 60: Instandhaltung des Korrosionsschutzes durch Teilerneuerung – Bewehrung  
Schröder € 13,50
- B 61: Untersuchung von Korrosion an Fußplatten von Schutzplankenpfosten  
Schröder, Staeck € 13,00
- B 62: Bewährungsnachweis von Fugenfüllungen ohne Unterfüllstoff  
Eilers € 12,00
- B 63: Selbstverdichtender Beton (SVB) im Straßentunnelbau  
Heunisch, Hoepfner, Pierson (†), Dehn, Orgass, Sint  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. € 17,50
- B 64: Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an einer Brückenkappe der Expositionsklasse XF4  
Bramshuber, Spörel, Warkus € 12,50

## 2009

- B 65: Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte  
Friese, Taffe, Wöstmann, Zoega  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. € 14,50
- B 66: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln  
Zulauf, Locher, Steinauer, Mayer, Zimmermann, Baltzer, Riepe, Kündig € 14,00
- B 67: Brandkurven für den baulichen Brandschutz von Straßentunneln  
Blosfeld € 17,50
- B 68: Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen – Teile 1-4  
Kaschner, Buschmeyer, Schnellenbach-Held, Lubasch, Grünberg, Hansen, Liebig, Geißler  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. € 29,50
- B 69: Berücksichtigung der Belange behinderter Personen bei Ausstattung und Betrieb von Straßentunneln  
Wagener, Grossmann, Hintzke, Sieger € 18,50
- B 70: Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen  
Tauscher € 14,50

## 2010

- B 71: Empfehlungen für geschweißte KK-Knoten im Straßenbrückenbau  
Kuhlmann, Euler € 22,50
- B 72: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von permanenten Anti-Graffiti-Systemen  
Weschpennig, Kropf, von Witzhausen € 13,50

B 73: Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln

Dehn, Nause, Juknat, Orgass, König

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. € 21,00

B 74: Verwendung von Anti-Graffiti-Systemen auf Mauerwerk

Müller € 14,00

B 75: Sachstand Verstärkungsverfahren – Verstärken von Betonbrücken im Bestand

Schnellenbach-Held, Peeters, Scherbaum € 13,50

## 2011

B 76: Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagssystems

Sedlacek, Paschen, Feldmann, Geßler, Möller,

Steinauer, Scharnigg € 17,00

B 77: Anpassung von DIN-Fachberichten „Brücken“ an Eurocodes

Teil 1: DIN-FB 101 „Einwirkung auf Brücken“

Teil 2: DIN-FB 102 „Betonbrücken“

Teil 3: DIN-FB 103 „Stahlbrücken“

Teil 4: DIN-FB 104 „Verbundbrücken“

Freundt, Böning, Maurer, Arnold, Gedwien, Müller,

Schrick, Tappe, Kuhlmann, Rasche, Froschmeier,

Euler, Hanswille, Brauer, Bergmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. € 29,50

B 78: Bemessung von Wellstahlbauwerken – Vergleich nach den bisherigen und den neuen Richtlinien

Kuhlmann, Günther, Krauss

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. € 18,50

B 79: Untersuchungen zur Querkraftbemessung von Spannbetonbalken mit girlandenförmiger Spanngliedführung

Maurer, Kiziltan, Zilch, Dunkelberg, Fitik

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. € 15,50

B 80: Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Straßentunneln

Mayer, Reimann, Löwer, Brettschneider, Los € 16,00

B 81: Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse

Müller, Vogel, Neumann € 14,50

B 82: Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand

Freundt, Böning € 16,00

B 83: Konzeption zur Nachrechnung bestehender Straßenbrücken

Maurer, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg € 16,00

B 84: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)

Gehlen, Lowke, Milachowski € 15,00

B 85: Entwicklung von Verfahren einer zuverlässigkeitsbasierten Bauwerksprüfung

Zilch, Straub, Dier, Fischer € 19,50

B 86: Untersuchungen an Bauwerken aus hochfesten Beton

Nguyen, Freitag € 13,50

## 2012

B 87: Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie

Feldmann, Döring, Hellberg, Kuhnhenne, Pak, Mangerig,

Beucher, Hess, Steinauer, Kemper, Scharnigg € 17,00

B 88: Anpralllasten an Schutzeinrichtungen auf Brücken – Anpassung der DIN-Fachberichte „Stahlbrücken“ und „Verbundbrücken“ an endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen  
Kuhlmann, Zizza, Günther € 15,50

B 89: Nachrechnung von Betonbrücken zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Bauwerke  
Maurer, Heeke, Kiziltan, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg, Fitik € 19,50

B 90: Fugenbewegung an der Ruhrtalbrücke Mintard  
Eilers, Quaas, Staeck € 14,00

## 2013

B 91: Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen – Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr unter besonderer Berücksichtigung von Restnutzungsdauer und Verkehrsentwicklung  
Freundt, Böning € 15,00

B 92: Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel  
Kaundinya € 14,00

B 93: Querkrafttragfähigkeit von Fahrbahnplatten – Anpassung des DIN-Fachberichtes „Betonbrücken“ an die endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen  
Hegger, Reiß € 17,50

B 94: Baulicher Brandschutz für Tunnel in offener Bauweise – Rechnerischer Nachweis  
Peter, Knief, Schreyer, Piazzola  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 95: Erfahrungen mit selbstverdichtendem und hochfestem Beton im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen  
Tauscher € 17,00

B 96: Geothermischen Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken  
Adam € 17,00

B 97: Einfluss der veränderten Verkehrsführung bei Ertüchtigungsmaßnahmen auf die Bauwerksbeanspruchungen  
Freundt, Böning € 15,00

## 2014

B 98: Brückenseile – Gegenüberstellung von vollverschlossenen Seilen und Litzenbündelseilen  
Friedrich  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 99: Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen  
Fischer, Schneider, Thöns, Rücker, Straub  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 100: Roadtraffic Management System (RTMS)  
Freundt, Vogt, Böning, Pierson, Ehrle € 15,00

B 101: Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem  
Schnellenbach-Held, Fakhouri, Steiner, Kühn € 18,50

B 102: Adaptive „Tube-in-Tube“-Brücken  
Empelmann, Busse, Hamm, Zedler, Girmscheid € 18,00

B 103: Umsetzung des Eurocode 7 bei der Bemessung von Grund- und Tunnelbauwerken  
Briebrecher, Städing € 14,00

B 104: Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse  
Borrmann, Fischer, Dori, Wild  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 105: Intelligente Brücke – Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke  
Schnellenbach-Held, Karczewski, Kühn  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 106: Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken  
Freundt, Vogt, Böning, Michael, Könke, Beinersdorf € 17,00

B 107: Materialeigenschaften von Kunststoffdichtungsbahnen bestehender Straßentunnel  
Robertson, Bronstein, Brummermann € 16,00

B 108: Fahrzeug-Rückhaltesysteme auf Brücken  
Neumann, Rauer € 18,50

B 109: Querkrafttragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken  
Hegger, Herbrand € 17,00

B 110: Intelligente Brücke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton  
Schnellenbach-Held, Peeters, Miedzinski  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 111: Erarbeitung von Modellen zur Bestimmung der Schadensumfangsentwicklung an Brücken  
Müller € 15,00

## 2015

B 112: Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken  
Kuhlmann, Maier, Ummenhofer, Zinke, Fischer, Schneider € 14,00

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7  
28195 Bremen  
Tel. (0421) 3 69 03-53  
Fax (0421) 3 69 03-48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.