

**BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR**  
FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN  
PROFESSUR MASSIVBAU II

**Diplomarbeit**

**Thema**

**Bewertung von Verbundkonstruktionen nach der  
Effizientwertmethode**

Einreichung: Christian Heidenreich

Matrikelnummer: 990187

Seminargruppe: B/99/E

Reg.-Nr.: B/128/04

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. habil. J. Ruth

Zweitprüfer: Dr.-Ing. V. Bayer

Ausgabedatum: 01.12.2004

Abgabedatum: 01.03.2005

# Inhaltsverzeichnis

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>IV</b>
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1 PROBLEMÜBERSICHT .....	1
1.2 ZIELSTELLUNG .....	2
1.3 INHALT UND AUFBAU.....	3
<b>2 VERBUNDBRÜCKENKONSTRUKTIONEN .....</b>	<b>4</b>
2.1 ALLGEMEINES .....	4
2.2 EINSATZ VON GFK IM VERBUNDBAU .....	6
<b>3 EFFIZIENZWERTMETHODE .....</b>	<b>7</b>
3.1 ALLGEMEINES .....	7
3.2 WICHTUNG DER KRITERIEN .....	9
3.2.1 <i>Wichtung der Einzelkriterien</i> .....	9
3.2.2 <i>Einfluss des dynamischen Wichtungsfaktors</i> .....	10
3.3 NORMIERUNG DER EINZELWERTUNGEN .....	10
3.4 PROZEDERE – TOOL ZUR BERECHNUNG DER EFFIZIENZ .....	12
3.4.1 <i>Allgemeines</i> .....	12
3.4.2 <i>Programmstruktur</i> .....	12
3.5 BEDEUTUNG EINES EXPERTENGREMIUMS.....	13
<b>4 KRITERIENKATALOG.....</b>	<b>14</b>
4.1 ALLGEMEINES .....	14
4.2 NUTZEN .....	16
4.2.1 <i>Tragen</i> .....	16
4.2.2 <i>Gebrauchen</i> .....	21
4.2.3 <i>Erleben</i> .....	28
4.3 AUFWAND.....	34
4.3.1 <i>Ökonomie</i> .....	34
4.3.2 <i>Ökologie</i> .....	39

<b>5</b>	<b>VERGLEICHSTRÜCKENKONSTRUKTIONEN.....</b>	<b>42</b>
5.1	ALLGEMEINES .....	42
5.2	MATERIALKENNWERTE.....	43
5.2.1	<i>Betonstahl</i> .....	43
5.2.2	<i>Beton</i> .....	43
5.2.3	<i>Baustahl</i> .....	43
5.2.4	<i>GFK – Pultrusionsprofil als Längsträger</i> .....	44
5.2.5	<i>GFK – Plankenprofil (SAFPLANK®)</i> .....	46
5.2.6	<i>GFK als Bewehrung und Schubverdübelungselement</i> .....	47
5.2.7	<i>Klebeverbindung</i> .....	48
5.3	VERGLEICHSTRÜCKENÜBERBLICK .....	49
5.3.1	<i>Variante 1 – Stahl/Beton-Verbundbrücke</i> .....	50
5.3.2	<i>Variante 2 – GFK/Beton-Verbundbrücke</i> .....	52
5.3.3	<i>Variante 3 – GFK/Beton-Verbundbrücke + SAFPLANK®</i> ...	54
5.3.4	<i>Variante 4 – GFK/Beton-Verbundbrücke + Filigranplatte</i> ...	56
5.3.5	<i>Variante 5 – GFK/Beton - Verbundbrücke (GFK - Bewehrung)</i> .....	58
<b>6</b>	<b>BEIWERTERMITTLUNG.....</b>	<b>59</b>
6.1	ALLGEMEINES .....	59
6.2	BEIWERTE DER BEWERTUNG DES NUTZENS.....	59
6.3	BEIWERTE DER BEWERTUNG DES AUFWANDS.....	60
6.3.1	<i>Ökonomie</i> .....	61
6.3.2	<i>Ökologie</i> .....	69
<b>7</b>	<b>BEWERTUNG DER VERGLEICHSTRÜCKEN.....</b>	<b>71</b>
7.1	ALLGEMEINES .....	71
7.2	BEWERTUNG DES NUTZENS .....	72
7.2.1	<i>Tragen</i> .....	72
7.2.2	<i>Gebrauchen</i> .....	75
7.2.3	<i>Erleben</i> .....	80
7.3	BEWERTUNG DES AUFWANDS.....	83
7.3.1	<i>Ökonomie</i> .....	83

---

7.3.2	Ökologie.....	97
<b>8</b>	<b>AUSWERTUNG UND WICHTUNGSVARIATION .....</b>	<b>102</b>
8.1	ALLGEMEINES .....	102
8.2	AUSWERTUNG.....	102
8.2.1	<i>Auswertungsvarianten.....</i>	<i>102</i>
8.3	BEWERTUNG.....	103
8.4	EFFIZIENZWERTBERECHNUNG MIT PROZEDERE TOOL.....	109
8.4.1	<i>Auswertung der EWM – Anwendung .....</i>	<i>113</i>
<b>9</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>116</b>
9.1	ZUSAMMENFASSUNG .....	116
9.2	AUSBLICK .....	119
	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>I</b>
	<b>ANHANG .....</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>GFK – BEWEHRUNGSHINWEISE .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>GESPRÄCHSPROTOKOLLE .....</b>	<b>3</b>
2.1	FIBERLINE A/S.....	3
2.2	BÜRGERMEISTER KLIPPHAUSEN .....	4
2.3	STRAßENBAUAMT SCHWERIN .....	5
2.4	WUPPERTAL – INSTITUT .....	6
2.4.1	<i>Kaiser, Claudia.....</i>	<i>6</i>
2.4.2	<i>Ritthoff, Michael .....</i>	<i>7</i>
2.5	STRONGWELL CORPORATION.....	8
<b>3</b>	<b>MIPS - WERTE .....</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>HOAI – BEIWERTE .....</b>	<b>10</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Kriterienkatalog nach Eisert.....	15
Abbildung 2	Entwicklung des weltweiten Stahlverbrauchs .....	35
Abbildung 3	Strongwell EXTREN DWB 36" – 914,4mm, Design Guide, Metric Design Information, Seite 22-17 .....	45
Abbildung 4	SAFPLANK - Profil, Strongwell Virginia, USA.....	46
Abbildung 5	Brückenansicht .....	49
Abbildung 6	Querschnitt; Variante Nr.1 .....	50
Abbildung 7	Querschnitt; Variante Nr.2 .....	52
Abbildung 8	Profilstäbe.....	52
Abbildung 9	Querschnitt; Variante Nr. 3 .....	54
Abbildung 10	Querschnitt; Variante Nr. 4 .....	56
Abbildung 11	Querschnitt; Variante Nr.5 .....	58
Abbildung 12	Bauwerksinstandhaltung [29].....	64
Abbildung 13	Korrosionsschutzmaßnahmen .....	66
Abbildung 14	Instandsetzung und Erneuerung der Beläge .....	67
Abbildung 15	Instandsetzung Betonflächen .....	68
Abbildung 16	Instandsetzung Fahrbahnübergänge.....	68
Abbildung 17	Instandhaltungs- /Betriebskosten .....	93
Abbildung 18	Eingabemaske der Kosten [Prozedere] .....	95
Abbildung 19	Prozedere; Eingabe der Ökologie.....	101
Abbildung 20	Gesamtkosten im Überblick.....	104
Abbildung 21	Brückengewicht .....	106
Abbildung 22	ökol. Gewicht – ohne Transport.....	106
Abbildung 23	ökol. Gewicht – inkl. Transport .....	106
Abbildung 24	Ökologiequotient – ohne Transport .....	106
Abbildung 25	Ökologiequotient – mit Transport.....	106
Abbildung 26	Ökologische Betrachtung in Prozenten .....	108

---

Abbildung 27	Einfluss des dynamischen Wichtungsfaktor auf Effizienzbewertung .....	112
Abbildung 28	Variation der Nutzenbeiwerte .....	112
Abbildung 29	Variation der Aufwandsbeiwerte .....	112
Abbildung 30	Einfluss des dyn. Wichtungsfaktor auf Effizienzbewertung – inkl. Opt. Kriterien .....	115

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemübersicht

Entwurf und Bewertung von Bauwerken werden immer durch die „Kreativität und Lernfähigkeit des Entwerfenden“ [17] beeinflusst werden. Deshalb werden oft für nicht am Planungsprozessbeteiligte unverständliche Ausführungsvarianten erstellt. Da es sich bei Bauwerken aber um einen Teil der gebauten Umwelt handelt, lastet eine enorme Verantwortung auf den Schultern des Entwerfenden. Aus diesem Grund gibt es schon seit vielen Jahrzehnten eine kontroverse Diskussion über die Einführung eines hippokratischen Eides für Wissenschaftler und Ingenieure. Die Vereinigung Deutscher Ingenieure hat schon 1950 die Aufnahme von:

»Der Ingenieur übt seinen Beruf aus in Ehrfurcht vor den Werten jenseits von Wissen und Erkennen ... Der Ingenieur stelle seine Berufsarbeit in den Dienst der Menschheit und wahre im Beruf die gleichen Grundsätze der Ehrenhaftigkeit, Gerechtigkeit und Unparteilichkeit, die für alle Menschen Gesetz sind. Der Ingenieur arbeite in Achtung vor der Würde des menschlichen Lebens und in der Erfüllung des Dienstes an seinem Nächsten ...« [13]

in Ihre Satzung vorgeschlagen. Eine Umsetzung wurde allerdings bis heute nicht erreicht.

Nichtsdestotrotz ist es sehr wichtig als Ingenieur seinem Nächsten und der Umwelt mit besten Wissen und Gewissen zu dienen. Aus diesem Grund sollte jeder Entwurf diskutiert, bewertet und entsprechend verbessert werden. In diesem Zusammenhang ist es wichtig Bewertungsverfahren zu verwenden, welche weitestgehend objektiv, überprüfbar und ganzheitlich sind. Sehr wichtig ist auch, die Bewertung schon während der Planungsphase zu beginnen. Somit kann eine sofortige Verbesserung der Entwürfe und eine kürzere Realisierungsphase (und niedrigere Kosten) angestrebt werden.

## 1.2 Zielstellung

### Einblick

Es soll eine klassische Stahl/Beton – Verbundbrücke mit einer GFK/Beton – Verbundbrücke verglichen werden. Hierbei ist es wichtig nicht nur die verschiedenen Bauweisen zu bewerten, sondern speziell auch auf die verschiedenen Baustoffe, die ökologischen und ökonomischen Belange einzugehen.

In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze zur Bewertung von Bauwerken, vgl. hierzu [5]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Effizienzwertmethode von Eisert [5] mit dem Kriterienkatalog, vgl. [15] und [20] zur Bewertung herangezogen.

### Aufgabenstellung

Aus den in der vorangegangenen Studienarbeit [9] entwickelten Brückenkonstruktionen in Stahl / Beton – oder GFK / Beton – Verbundbauweise sind die technisch machbaren und ökonomisch sinnvollsten Varianten für die weitere Betrachtung auszuwählen. Diese Varianten sollen mit Hilfe der Effizienzwertmethode (EWM) vergleichend bewertet werden.

Die Vergleichsbrücken sind nach den verschiedenen in der EWM enthaltenen Kriterien zu bewerten. Bei den ökonomischen Kriterien sollen neben den Materialkosten auch baubetriebliche Vor- und Nachteile (Transportgewichte, verlorene Schalung) und Unterhaltungskosten erfasst werden. Auch soll nach ökologischen Kriterien bewertet werden, auch hier ist der gesamte Zyklus von der Herstellung bis zur Entsorgung zu berücksichtigen. Es wird von einer Lebensdauer von 100 Jahren ausgegangen. Soweit es für das gewählte Anwendungsbeispiel möglich und sinnvoll ist, soll versucht werden, ästhetische Kriterien durch Befragung von Architekten zu erfassen.

### 1.3 Inhalt und Aufbau

Im Kapitel 2 wird ein historischer Überblick über die Entwicklung von Verbundkonstruktionen gegeben und die prinzipielle Tragwirkung bzw. die Bemessungsgrundlagen beschrieben. Des Weiteren wird der Einsatz von GFK im Verbundbau im Hinblick auf die werkstoffgerechten Eigenschaften erläutert.

Die von Eisert [5] an der Bauhaus – Universität Weimar entwickelte Effizienzwertmethode (EWM) wird in Kapitel 3 vorgestellt. Zur Verdeutlichung der Variabilität wird die Möglichkeit der Wichtung der einzelnen Kriterien aufgezeigt. Eine zeitsparende Bewertung ist aufgrund des EWM – Programm – Tools Prozedere möglich.

Der der EWM zugrunde liegende Kriterienkatalog wird in Abschnitt 4 dargelegt. Hierbei werden die Kriterien des Nutzens und Aufwands aufgezählt und deren Einsatzmöglichkeit und Bewertungsbedarf diskutiert.

Die in der vorangegangenen Studienarbeit [9] entwickelten und mit der EWM zu bewertenden Vorzugsvarianten werden in Abschnitt 5 dargelegt. Zur besseren Verdeutlichung der materialspezifischen Unterschiede werden die einzelnen Materialkennwerte gegenübergestellt.

In Kapitel 6 werden für die einzelnen Kriterien benötigten Beiwerte ermittelt.

In Kapitel 7 wird die Bewertung anhand des Kriterienkatalogs und der ermittelten Beiwerte vorgenommen. Die einzelnen Werte werden für die Eingabe in das Tool Prozedere aufbereitet.

Die Auswertung erfolgt in Abschnitt 8 unter Zuhilfenahme der Wichtungsvariation. Somit werden verschiedene Varianten der Wichtung vorgestellt und diskutiert.

Abschließend wird in Kapitel 9 eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf weiterführende Überlegungen und anzustrebende Betrachtungen vorgenommen.

## 2 Verbundbrückenkonstruktionen

### 2.1 Allgemeines

#### Historischer Überblick

Die Anfänge des Verbundbaus lassen sich bis etwa 1900 zurückverfolgen. In den Anfangsjahren wurden konstruktiv mit Beton gefüllte Stahlrohre, zur Erhöhung des Brandwiderstandes und der Steifigkeit, hergestellt. Später wurde die Entwicklung von Verbunddeckensystemen vorangetrieben, hierbei wurde die gemeinsame Tragwirkung von Längsträger und Betondeck angestrebt. Mit der Entwicklung der Bolzenschweißtechnik wurden verstärkt Kopfbolzendübel verwendet. Durch die wirtschaftlichen und ingenieurtechnischen Vorteile kam es zu einem vermehrten Einsatz dieser Deckensysteme.

Durch die Entwicklung von Verbundträgern wurde auch die Verwendung im Brückenbau vorangetrieben. Der Verbundbrückenbau wurde aufgrund der Rohstoffknappheit und der großen Anzahl zerstörter Brücken nach dem 2. Weltkrieg rasant weiterentwickelt. Es musste ein Brückensystem entwickelt werden, welches sehr effizient und universell einsetzbar ist. Durch die Verbindung von Betonplatte mit den Stahllängsträgern wurde ein effizienteres Tragverhalten bei geringerem Materialverbrauch erreicht, vgl. [29]. Auf diese Weise werden bis heute hocheffiziente materialsparende und dem Werkstoffverhalten entsprechende Brücken entworfen.

Demgegenüber ist die GFK/Beton – Verbundbauweise eine gänzlich neue Entwicklung und kann sich somit nicht auf Erfahrungswerte und Referenzobjekte stützen.

## **Tragwirkung**

Die in der nachfolgenden Arbeit betrachtete Stahl/Beton – und GFK/Beton – Verbundbauweise verfolgen ein identisches Tragkonzept.

Durch eine geeignete Querschnittsgestaltung kann die hohe Zugfestigkeit des Stahls (GFK) und die hohe Druckfestigkeit des Betons optimal ausgenutzt werden.

Zur Erzielung einer gemeinsamen Tragwirkung sind beide Materialien schubfest miteinander zu verbinden. Der Verbindung von Längsträger und Betondeck ist im Verbundbau, aufgrund der sicherzustellenden Kraftübertragung in der Fuge, die größte Aufmerksamkeit zu schenken. Es muss garantiert werden, dass eine gemeinsame Tragwirkung zwischen beiden Tragwerksteilen vorherrscht.

## **Bemessungsgrundlagen**

Die Bemessung der klassischen Stahl/Beton- Verbundkonstruktionen erfolgt auf Grundlage der Eurocodes und DIN. Die derzeitige Umsetzung der Eurocodes in nationale Normung zieht eine Änderung vom globalen zum probabilistischen Sicherheitskonzept nach sich. Dennoch ist momentan eine Berechnung mit den noch gültigen DIN Normen (DIN18806-1 und „Ergänzende Bestimmungen zu den Richtlinien für die Bemessung und Ausführung von Stahlverbundträgern“, März 1981) zulässig. In der vorangegangenen Studienarbeit [9] wurden die Nachweise auf Basis des EC4 durchgeführt.

GFK stellt als Baustoff im Bauwesen eine Neuerung dar. Aus diesem Grund ist der Stand der Normung für die Anwendung und Berechnung von GFK – Bauteilen nicht sehr weit vorangeschritten. Für die Bemessung sind im Moment hauptsächlich Anwendungsrichtlinien der Hersteller zu empfehlen (z.B. Fiberline, [6]).

## **2.2 Einsatz von GFK im Verbundbau**

In der vorangegangenen Studienarbeit [9] wurde neben der konventionellen Stahl/Beton- die GFK/Beton- Verbundbauweise diskutiert. Hierbei wurde versucht, Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) alternativ als Längsträger einzusetzen. Bei der Abwandlung von bewährten Bauweisen ist vor allem die werkstoffgerechte Anwendung zu beachten. Aus diesem Grund ist nicht nur dem Längsträger sondern auch den Verbindungsmitteln verstärktes Interesse zukommen zu lassen.

Der Einsatz von GFK im Bauwesen kann durch die Resistenz gegenüber den Umweltmedien durchaus von Vorteil sein.

Neben den ingenieurtechnischen Untersuchungen wie Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit sind die Kriterien Ökologie und Ökonomie mit in die Analysen einzubeziehen.

## 3 Effizienzwertmethode

### 3.1 Allgemeines

Die Effizienzwertmethode (EWM) wurde am Lehrstuhl Massivbau II der Bauhaus – Universität Weimar entwickelt.

Im Rahmen der Dissertation von Eisert [5] wurden bestehende Bewertungsansätze herangezogen und hinsichtlich ihrer Bewertungsmöglichkeiten, vor allem aber auch hinsichtlich ihrer Schwächen begutachtet. Mit dem Anliegen ein ganzheitliches, flexibles, dabei übersichtliches und nachvollziehbares, ein vom Benutzer beeinflussbares und vor allem glaubwürdiges und stabiles Bewertungsverfahren zu schaffen, wurde die Effizienzwertmethode entwickelt.

Mit Hilfe der Effizienzwertmethode soll es möglich sein, tragfähige, gebrauchstaugliche, ökonomische und ökologische Gebäude zu planen und zu erschaffen. Hierbei soll „den nachfolgenden Generationen keine zusätzlichen Belastungen aus unserem derzeitigen Wirken“ ([5], Seite 41) aufgebürdet werden.

Bei der EWM wurde ein Bewertungsansatz gewählt, um der Ganzheitlichkeit gerecht zu werden, vgl. [5]. Es wird ein zuvor erstellter Kriterienkatalog verwendet, hierbei wird dem Vergessen von einzelnen Kriterien entgegengewirkt. Wird ein Aspekt bei der aktuellen Bewertungsaufgabe als nicht relevant oder vernachlässigbar eingestuft, so wird dieses Kriterium in der Bewertung vernachlässigt, aber nicht aus dem Kriterienkatalog gestrichen.

Um dem Anspruch der Ganzheitlichkeit gerecht zu werden, werden die beiden Hauptkriterien Nutzen und Aufwand von einander getrennt. So werden einmal die den Nutzen beschreibenden Kriterien zusammengefasst, hierzu zählen das Tragen, Gebrauchen und Erleben. Des Weiteren wird im Kriterium Aufwand eine Kombination von

„betriebswirtschaftlichem Sinn und Ressourcenverbrauch im ökologischen Sinn“ ([5], Seite 26) betrachtet.

Um einer größtmöglichen Flexibilität gerecht zu werden, ist es bei der EWM möglich, neben den exakten Werten infolge der statischen Berechnungen auch den kreativen Bereich mit in das Bewertungssystem einzubinden.

Der Kriterienkatalog und der Aufbau der Effizienzwertmethode [siehe Kapitel 4] ist auf eine größtmögliche Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit ausgerichtet. Hierzu wurden die Kriterien hierarchisch geordnet und thematisch getrennt, somit ist eine Dopplung ausgeschlossen.

Bei der Bewertung mittels der Effizienzwertmethode ist es möglich, nicht nur Standardlösungen zu erhalten, sondern auch extravagante Varianten. Die häufig ermittelten mittelmäßigen Varianten haben nicht etwa „ausgeprägte Stärken, sie haben vielmehr geringe Schwachpunkte“ ([5], Seite 27). Hierzu wurde ein dynamischer Wichtungsfaktor eingeführt. Die Bedeutung der Variation der Wichtung und des Wichtungsfaktors wird in [Kapitel 3.2] genauer diskutiert.

Die Genauigkeit und die Glaubwürdigkeit steigt und fällt mit dem Präzisionsgrad der Aufgabenstellung, dem Wissens- und Erkenntnisstand, der Erfassbarkeit der Merkmale und der richtigen Einschätzung der Bedeutung der herangezogenen Kriterien. Obwohl der Erkenntnisstand mit dem fortschreitenden Konstruktionsprozess zunimmt, ist es mit Hilfe der EWM möglich, eine Bewertung zu einem frühen Planungszeitraum mit entsprechend weniger Parametern durchzuführen. Somit können erste Ergebnisse direkt in die Planung einbezogen werden. Hierdurch kann der Erfolg des Projektes entscheidend beeinflusst werden, vgl. [5].

## 3.2 Wichtung der Kriterien

Im Rahmen einer Bewertung ist die vorhergehende Datensammlung die absolute Voraussetzung für deren Erfolg. Neben der reinen Zusammenstellung der Informationen ist festzuhalten, welche Kriterien welche Wichtigkeit für die geplante Aufgabe besitzen. Die Festlegung der Wichtung ist im Vorfeld durchzuführen, da es sonst zu nachträglichen Manipulationen kommen kann. Der in Kapitel 4 vorgestellte Kriterienkatalog ist wie in 3.1 beschrieben hierarchisch geordnet. Um den Einfluss gewisser Kriterien hervorzuheben, gibt es bei der EWM die Möglichkeit der unterschiedlichen Wichtung der einzelnen Kriterien.

Mit Hilfe des Wichtungsfaktors ist es möglich „den Anteil des Unterkriteriums am Gesamtkomplex“, „die kreativen Momente zum Ausdruck“ und eine mögliche „Beurteilung von Varianten unterschiedlicher Situationen“ ([5], Seite 40) darzustellen.

### 3.2.1 Wichtung der Einzelkriterien

Die Wichtung der Einzelkriterien ist für jede Bewertung aufgrund des individuellen Bedarfs neu festzulegen.

Die Effizienzwertmethode ist so aufgebaut, dass bei gleicher Wichtung der Einzelkriterien eines Nebenkriteriums und bei gleicher Wichtung der Nebenkriterien eines Hauptkriteriums ein akzeptables Ergebnis erzielt werden kann.

### 3.2.2 Einfluss des dynamischen Wichtungsfaktors

Neben der unterschiedlichen Wichtung der einzelnen Kriterien besteht die Möglichkeit der Suche nach extravaganen, ausgewogenen und Standardlösungen. Somit kann der Kritik Rechnung getragen werden, Bewertungsverfahren würden nur Standardlösungen favorisieren [vgl. Eisert]. Zur Einbeziehung des dynamischen Wichtungsfaktors wird ein Exponent  $\kappa$  eingeführt, welcher zwischen 0,5 (ausgewogene Lösung), 1,0 (Standardlösung) und 2,0 (extravagante Lösung) variiert.

Bei der Bewertung eines Bauwerks ist es unter Umständen möglich, dass mehrere Varianten den gleichen Nutzen bei linearer Wichtung der Einzelkriterien haben. Mit der Einführung und Variierung des dynamischen Wichtungsfaktors ist somit eine Differenzierung dieser Ergebnisse möglich, ohne sie zu manipulieren.

### 3.3 Normierung der Einzelwertungen

Die Einzelwertungen decken alle betrachteten Kriterien des Bauwerks ab. Hierdurch ergeben sich große Unterschiede im Wertebereich der Daten. Um eine globale Bewertung durchführen zu können, ist es notwendig alle Werte auf eine einheitliche Skala zu normieren. Bei der EWM wird für die gemeinsame Datenbasis eine Skala mit dem Wertebereich eins bis neun verwendet, „da dieses Spektrum bei der Beurteilung durch den Menschen die stabilsten und zugleich differenziertesten Ergebnisse liefert.“ ([5], Seite 36)

Die EWM verwendet, zur Ermittlung der Wertigkeiten innerhalb eines Kriteriums, den „bezogenen Rangvektor“. Diese Gleichung geht auf Dyer ([5], Kapitel 3.2.11) unter Berücksichtigung einer variablen Bandbreite zurück.

$$\bar{r}_i = \frac{\sum x_i - x_{\min} + 2 * x_i}{2 * \sum x_i}$$

$X_{\max}$  - maximaler Wert des x-ten Kriteriums

$X_{\min}$  - minimaler Wert des x-ten Kriteriums

$X_i$  - Wert des x-ten Kriteriums der i-ten Variante

*Gleichung 3.1 Bezogener Rangvektor*

Aufgrund der Normierung werden die einzelnen Bewertungsergebnisse um einen Mittelwert angeordnet.

### **3.4 Prozedere – Tool zur Berechnung der Effizienz**

#### **3.4.1 Allgemeines**

Die Bewertung von Bauwerken nach der Effizienzwertmethode wird durch das zugehörige Programmtool Prozedere aufgrund der großen Datenmengen merklich erleichtert. Dieses Programm wurde auf Basis des Datenbankprogramms Access unter Zuhilfenahme von Visual Basic erstellt. Ein großer Vorteil ist die projektbezogene Ablegung der Daten.

Das Programm wurde durch die Auslagerung der Ermittlung der Einzelkriterien sehr einfach und übersichtlich gehalten. Dennoch ist eine umfangreiche Vorbereitungsarbeit zur Datenerfassung und Aufbereitung von Nöten. Durch die Trennung von Vorbereitung und Auswertung ist keine geschlossene Lösung möglich. Des Weiteren ist es notwendig, bei der Übertragung der aufbereiteten Daten in das Tool Prozedere keine Fehler entstehen zu lassen (Übertragungsfehler der Daten).

#### **3.4.2 Programmstruktur**

Eine genaue Beschreibung des Programms ist in Kapitel 5 von [5] zu finden.

Das Programm ist an die hierarchische Struktur des in Kapitel 4 vorgestellten Kriterienkatalogs angelehnt. Somit folgen nach der Auswahl des Projektes und der Wahl des dynamischen Wichtungsfaktors (ausgewogen, extravagant, Standard) verschiedene Fenster, in welchen die einzelnen Kriterien mit Daten versehen werden. Nach Eingabe der Kriterien (Nutzen- und Aufwandskriterien) erfolgt jeweils die Normierung. Hierbei ist zuvor die Wichtung der einzelnen Kriterien festzulegen. Auf diesem Wege ist es auch möglich, nicht beachtete oder nicht bewertbare Kriterien auszuschließen.

Nach Beendigung aller Eingaben und Auswertungen gibt das Programm eine Rangliste an.

Des Weiteren ist zu erwähnen, das Programm speichert alle Einträge automatisch in einer Datenbank. Ein Zugriff ohne erneute Dateneingabe

ist somit möglich. Um die Auswirkungen des dynamischen Wichtungsfaktors zu verdeutlichen, kann eine Instanz von zuvor erstellten Datenbanken erzeugt werden.

### **3.5 Bedeutung eines Expertengremiums**

Die Kriterien des Tragens und Gebrauchens sind infolge statischer Berechnungen und Materialeigenschaften weitestgehend objektiv einschätzbar, siehe hierzu Kapitel 7.2.

Demgegenüber ist die Einschätzung der Kriterien des Erlebens, vor allem der Optik nur sehr schwer objektiv zu gestalten. Doch die subjektive Bewertung des Bauwerks kann durch die Einschaltung eines Expertengremiums als weitestgehend objektiv ausgelegt werden. Trotz allem wird die Bewertung der Optik immer einen menschlichen Faktor beinhalten, und somit werden die Bauwerke individuell und abwechslungsreich sein.

Eine solche Expertengruppe sollte im Vorfeld der Arbeiten zusammengestellt werden und ein möglichst breites Interessengebiet abdecken. Hierzu zählen unter anderem Architekten, Ingenieure, Projektmanager, Umweltsachverständige und vor allem Personen der späteren Nutzergruppe. Neben der Einschätzung der Wertigkeiten der Einzel- und Nebenkriterien sollte eine Entscheidung über die Entwurfsrichtung (extravagant, Standard, ausgewogen) festgelegt werden.

Die angestrebte Wichtung ist vom Gremium festzuhalten, um spätere Manipulationen zu verhindern. „Im Extremfall kann man jedes gewünschte Ergebnis durch die wichtungsbedingte Auswahl der Einzelkriterien erzielen.“ ([5], Kapitel 6.2.4.1, Seite 134)

## 4 Kriterienkatalog

### 4.1 Allgemeines

Der in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Kriterienkatalog, siehe Abbildung 1, zur Bestimmung der Effizienz wurde von Eisert [5] übernommen. Bei den von Eisert verwendeten Kriterien handelt es sich um eine Zusammenfassung der Kriterienkataloge aus den Diplomarbeiten von Riedel [15] und Sorg [20].

„Der Kern der EWM ...besteht in erster Linie aus der Sammlung der Bewertungskriterien sowie der übergeordneten Struktur.“ ([5], Seite 41). Hierzu sind die Kriterien aufzulisten und hierarchisch entsprechend Nutzen und Aufwand zu gliedern. Bei der Auflistung ist die strikte Trennung von Nutzen und Aufwand zu wahren. Somit dürfen keine Kriterien des Nutzens Aufwandskriterien enthalten.

Des Weiteren sind die Kriterien des Nutzens und Aufwands zur besseren Fassbarkeit und Verdeutlichung in Haupt-, Neben- und Einzelkriterien zu unterteilen.

Alle ermittelten Daten der einzelnen Kriterien sind kritisch zu prüfen. Vor allem die Bewertung der Aufwandskriterien, sowie der Optik und Haptik sollte die Arbeit einer entsprechenden Expertengruppe sein, vgl. Kapitel 3.5.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Kriterienkatalog (Abbildung 1) auf ein Verbundbrückensystem angewandt. Somit wird in den nachfolgenden Abschnitten ein kurzer Überblick über die einzelnen Kriterien gegeben. Ebenso wird die Anwendbarkeit einzelner Kriterien für die gegebene Aufgabenstellung diskutiert.

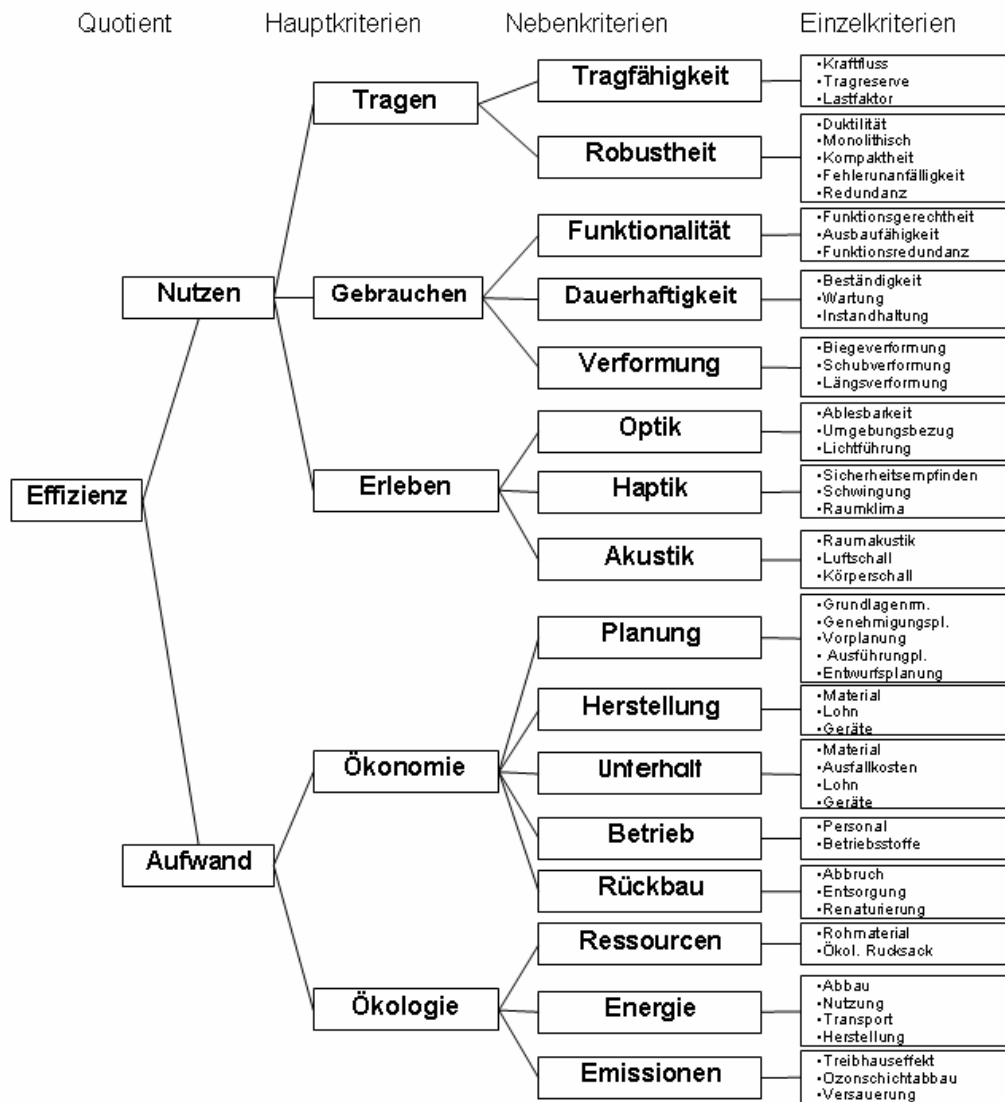


Abbildung 1 Kriterienkatalog nach Eisert

Die Anwendung des Katalogs ist in Kapitel 7 an einem Beispiel gezeigt. Die vorausgehende Ermittlung der Daten ist in Kapitel 6 beschrieben.

## 4.2 Nutzen

Der Nutzen wird nach Eisert [5] in die Hauptkriterien Tragen, Gebrauchen und Erleben untergliedert. Um eine genaue Beschreibung des Tragwerks zu erreichen, werden die Hauptkriterien weitergehend in Nebenkriterien und Einzelkriterien unterteilt. Auf diese Weise ist eine exakte und nachvollziehbare Bewertung des Tragwerks möglich.

### 4.2.1 Tragen

Das Kriterium Tragen wird in die Nebenkriterien Tragfähigkeit und Robustheit unterteilt.

Die Bewertung dieses Kriteriums erfolgt rein objektiv durch die Anwendungsmöglichkeit der von Eisert [5] angegebenen Formeln.

#### (1) Tragfähigkeit

##### Tragreserve

- Tragfähigkeit eines Bauteils über geforderten Wert hinaus
- Entstehen durch Nichtausnutzung von Geometrie- und Materialgrößen

##### Berechnung:

$$K_{\text{Tragreserve}} = \frac{E_{\text{zul}} - E_{\text{vorh}}}{E_{\text{zul}}}$$

$E_{\text{zul}}$	- zul. Einwirkung
$E_{\text{vorh}}$	- vorh. Einwirkung (z.B. max M)

Gleichung 4.1: Kriterium Tragreserve

##### Lastfaktor

- Verhältnis von Eigengewicht zu aufnehmbarer Last, beschreibt Kapazität des Tragwerks

##### Berechnung:

$$K_{\text{Lastfaktor}} = \frac{q_k}{g}$$

$q_k$	- Nutzlast
$g$	- Eigenlast

Gleichung 4.2: Kriterium Lastfaktor

## Kraftfluss

- Dem Kraftfluss angepasste Tragwerke sind materialsparender, da sie die vorhandene Tragstruktur effizienter nutzen

### Berechnung:

- Aufaddieren der Umlenkwinkel einer vertikal auf Betondeck angesetzten Kraft bis zum Auflager

$$K_{\text{Kraftfluss}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (\sin\beta) \times \alpha_i}$$

$\alpha_i$  - Umlenkwinkel an der Umlenkstelle i  
 $\beta_{\text{max},i}$  - max. Umlenkwinkel an der Stelle i

*Gleichung 4.3: Kriterium Kraftfluss*

## (2) Robustheit

Im Kriterium Robustheit wird die Unempfindlichkeit des Bauwerks gegenüber Einwirkungen charakterisiert. Hierzu werden die Kriterien Duktilität, Kompaktheit, Redundanz und Fehlerunanfälligkeit untersucht.

### Duktilität

- Fähigkeit eines Tragwerks unter Belastung plastische Verformungen zu realisieren
- Rotationsvermögen ist als Indiz für Duktilität heranzuziehen

#### Berechnung:

- Berechnung der Duktilität über Rotationsvermögen horizontaler Bauteile mittels Gleichung 4.4

$$K_{\text{Duktilität}}^h = \frac{b_w}{b} + \frac{l}{h} + \frac{1}{\lambda}$$

$b_w$	- Stegbreite im Stützbereich
$b$	- Plattenbreite im Stützbereich
$l$	- wirksame Stützweite
$h$	- Bauteilhöhe
$\lambda$	- Vorspanngrad

*Gleichung 4.4: Kriterium Duktilität, horizontales Bauteil*

### Kompaktheit

- Eigenschaft von Tragwerken statischen Anforderungen großen Widerstand und physikalischen bzw. chemischen Einwirkungen geringe Angriffsflächen zu bieten

#### Berechnung:

- Gedrungene, horizontale Bauteile sind durch das Verhältnis von Widerstandsfläche zu Bauteiloberfläche zu berechnen [vgl. Gleichung 4.5]

$$K_{\text{Kompaktheit}}^{h, \text{gedr.}} = \frac{W_o}{A_o}$$

$W_o$	- Widerstandsmoment [m <sup>3</sup> ]
$A_o$	- Bauteiloberfläche [m <sup>2</sup> ]

*Gleichung 4.5: Kriterium Kompaktheit, hor. Bauteil, gedr. Querschnitt*

## Redundanz

- das „im Überfluss vorhandene“ (v. lat. redundare), vgl. [www.wikipedia.org]
- zusätzliche Tragreserven infolge Kräfteumlagerung können als Redundanz bei Tragwerken verstanden werden

### Berechnung:

- Bestimmung über Grad der statischen Unbestimmtheit

$$K_{\text{Redundanz}}^{\text{SW,e}} = S_A + S_G - 3 * S_S$$

$S_A$	- Summe der Auflagerreaktionen
$S_G$	- Summe der Gelenke
$S_S$	- Summe der Stabelemente

Gleichung 4.6 Kriterium Redundanz, ebenes Stabwerk

## Monolithisch

- Fugen stellen Angriffsflächen für chemische und physikalische Angriffe dar, somit gelten sie als Ausgangsort einer möglichen Schädigung
- Monolithische Tragwerke sind resistenter gegenüber Umweltmedien
- Grad der monolithischen Bauweise wird über Lage und Art der Fugen beurteilt

### Berechnung:

$$K_{\text{Monolithisch}} = \frac{\sum_{i=1}^n A_{O,i}}{\sum_{i=1}^n x_{\text{Fuge}} \times A_{F,i}}$$

$A_{F,i}$	- Fugenfläche
$A_O$	- Bauteiloberfläche
$x_{\text{Fuge}}$	- Art der Fuge
	0,8 hor. Außenliegend
	1,0 vert. Außenliegend
	0,1 hor. Innenliegend
	0,3 vert. Innenliegend

Gleichung 4.7 Kriterium Monolithisch

## Fehlerunanfälligkeit

- beeinflusst durch Geometrie des Tragwerks, die Anzahl der Fugen, das Herstellverfahren, die Verwendung von Einbauteilen, die Verwendung von verschiedenartigen Stahlbausorten und -profilen, der Anwendung eines Vorspannverfahrens und der vorhandene Toleranzspielraum

- |                      |  |
|----------------------|--|
| ○ Geometrie:         | Im Kriterium Kompaktheit enthalten   |
| ○ Fugen:             | Im Kriterium Monolithisch enthalten  |
| ○ Bewehrungsgrad:    | hohe Bewehrungsgrade können zu Fehlern führen<br>$x_{F,1} = 1,00$ Bewehrungsdichte <3%<br>$x_{F,1} = 1/(\rho \cdot 50)$ Bewehrungsdichte >3%   |
| ○ Herstellverfahren: | Der Ort der Herstellung kann die Qualität entscheidend beeinflussen<br>$x_{F,2} = 0,0 - 0,3$ Herstellung vor Ort<br>$x_{F,2} = 0,8 - 1,0$ Herstellung im Werk  |
| ○ Einbauteile:       | Die Verwendung kann zu erhöhten Fehlergraden führen<br>$x_{F,3} = 1/a_E$ $a_E$ – Anzahl der Einbauteile  |
| ○ Stahl:             | Die Verwendung unterschiedlicher Stahlsorten und -querschnitte kann eine erhöhte Fehlerquelle sein<br>$x_{F,4} = 1/a_M$ $a_M$ – Anzahl der Mattentypen<br>$x_{F,5} = 1/a_S$ $a_S$ – Anzahl der Stabstahlquerschnitte<br>$x_{F,6} = 1/a_P$ $a_P$ – Anzahl der Profilstahlsorten |
| ○ Vorspannen:        | Vorspannen als technisch anspruchsvoller Vorgang erhöht die Zahl der Fehlerquellen beträchtlich<br>$x_{F,7} = 0$ kompliziertes Vorspannverfahren<br>$x_{F,7} = 1$ keine Vorspannung  |
| ○ Toleranz:          | Vorhandensein von Toleranzspielräumen kann Maßungenauigkeiten und somit Fehlerquellen ausmerzen<br>$x_{F,8} = 0$ kein Toleranzspielraum<br>$x_{F,8} = 1$ großer Toleranzspielraum  |

### Berechnung:

- Herangezogene Kriterien aufaddieren und durch die Anzahl dividieren

$$K_{\text{Fehlerunanfälligkeit}} = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^n x_{F,i}$$

Gleichung 4.8 Kriterium Fehlerunanfälligkeit

### 4.2.2 Gebrauchen

Im Kriterium Gebrauchen werden alle Lebenszyklusweiten Faktoren beachtet. Es wird unter anderem bewertet, inwieweit das Tragwerk dauerhaft ist, wie sich die Verformungen unter Belastung entwickeln und das Kriterium der Funktionalität erfüllt ist.

Die Bewertung der Funktionalität mittels Formeln, siehe Eisert [5], täuscht eine gewisse Objektivität und Berechenbarkeit vor. Jedoch basiert die Bewertung dieses Kriteriums auf subjektiven Einschätzungen. Mit Hilfe von Formeln wird lediglich der Mittelwert der betrachteten Einflüsse gebildet. Für die Bewertung der Dauerhaftigkeit werden die zu betrachtenden Parameter über angegebene Skalen (1-9) subjektiv bewertet, aufaddiert und anschließend der Mittelwert gebildet.

Demgegenüber sind die Verformungen eines Bauwerks aufgrund der eindeutigen Berechenbarkeit objektiv zu bewerten.

#### (1) Funktionalität

Die Funktionalität eines Bauwerks wird laut Eisert [5] durch die Funktionsgerechtigkeit, die Ausbaufähigkeit und die Funktionsredundanz charakterisiert.

#### Funktionsgerechtigkeit

- Bewertung der Erfüllung der Anforderungen an ein Bauwerk
- Definition der Einzelanforderungen hat für jedes Tragwerk individuell zu erfolgen

#### Berechnung:

- Mittelwertbildung der Einzelanforderungen nach Gleichung 4.9

$$K_{\text{Funktionsgerechtigkeit}} = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^n x_{E,i} = 1 \quad x_{E,i} \text{ - Erfüllungsgrad der Einzelanforderungen}$$

Gleichung 4.9: Kriterium Funktionsgerechtigkeit

### **Ausbaufähigkeit**

- Aufnahmefähigkeit einer Konstruktion von technischem Ausbau, vor allem Haustechnik
- Bei der Bewertung einer Brückenkonstruktion nicht relevant
- Ist eine Überprüfung der Ausbaufähigkeit vorzunehmen ist in Eisert [5] die entsprechende Vorgehensweise nachzuschlagen

### **Funktionsredundanz**

- Multifunktionale Bauteile erfüllen neben der reinen Tragwirkung weitere Aufgaben, hierzu zählen vor allem raumabschließende Tragwerke
- Im Brückenbau ist im Allgemeinen auf dieses Kriterium zu verzichten
- Die Durchführung zur Bewertung dieses Kriteriums ist in Eisert [5] zu finden

## (2) Dauerhaftigkeit

„Eine angemessene Dauerhaftigkeit des Tragwerks ist gegeben, wenn während der vorgesehenen Nutzungsdauer die Funktion des Tragwerks hinsichtlich der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit ohne wesentlichen Verlust der Nutzungseigenschaften gegeben ist.“ [22]

Hochbauwerke werden in der Regel für 50 Jahre entworfen, Brückenbauwerke im Allgemeinen für 80-100 Jahre. Um diese Bestandszeiten garantieren zu können werden in den folgenden Abschnitten die Beständigkeit der verwendeten Materialien, die Möglichkeiten der Wartung und Instandhaltung charakterisiert.

### Beständigkeit

- Beständigkeit ist abhängig von Baumaterialien, Beanspruchungsart und Widerstand des Bauteils gegenüber der Einwirkungen
- Beständigkeit von Massivkonstruktionen ist maßgeblich von Schutz des Bewehrungsstahls abhängig

### Berechnung:

- Einzelanforderungen sind mittels 1-9 Skala abzuschätzen:

Tabelle 1 Einzelanforderungen der Beständigkeit

Rissbreite	groß	mittel	klein	sehr klein	keine
Betondeckung	klein		mittel		groß
Betonfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	15	35	55	75	95
Nachbehandlung	keine	mäßig	normal	gut	sehr gut
<b>Bewertung</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>9</b>

- Mittelwert bilden (siehe Gleichung 4.10):

$$K_{\text{Beständigkeit}} = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^n x_{F,i}$$

Gleichung 4.10 Kriterium Beständigkeit

## Wartung

- Tragwerke sind während der Lebensdauer regelmäßig zu warten
- Sichtbarkeit und Zugänglichkeit der tragenden Bauteile gewährleisten gute Wartungsbedingungen und somit eine gleich bleibende Qualität des Bauwerks

### Berechnung:

- Einzelanforderungen sind mittels 1-9 Skala abzuschätzen:

Tabelle 2 Einzelanforderungen der Wartung

Zugänglichkeit	Voll- verkleidung		leichte Verkleidung	keine Verkleidung	
Sichtbarkeit	keine	mäßig	normal	gut	sehr gut
<b>Bewertung</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>9</b>

- Mittelwert bilden (siehe Gleichung 4.11):

$$K_{\text{Wartung}} = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^n x_{F,i}$$

Gleichung 4.11 Kriterium Wartung

## Instandhaltung

- Bewertung der Beeinflussbarkeit eines Bauwerks während der Bestandszeit, hierzu zählt unter anderem die Schadensbehebung
- Die Möglichkeit der Instandsetzung wird durch die Zugänglichkeit, die Störung des Betriebs, die Zahl der anzuwendenden Verfahren, die vorhandene Oberflächenfestigkeit und die Art des Bewehrungsstahls beeinflusst
- In [5] ist eine hohe Anzahl anzuwendender Verfahren als positiv und somit mit hohem Skalenwert zu werten, im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Notwendigkeit vieler Instandsetzungsverfahren als negativ betrachtet und somit die Skala für diesen Parameter gedreht

- Zur Definition der Bewertungsskala sollte eine Diskussion zur Abwägung zwischen der Notwendigkeit und Möglichkeit vieler durchzuführender Einzelinstandsetzungsverfahren angestellt werden

### Berechnung:

- Einflussgrößen sind zu bewerten:

Tabelle 3 Einzelanforderungen der Instandhaltung

Zugänglichkeit	keine	gering	mittel	gut	sehr gut
Störung Betrieb	Bauwerk		lokal		gering
Zahl der Verfahren	sehr viele	wenige	mittel	viele	keine
Oberflächenfest. [N/mm <sup>2</sup> ]	β<1		β=3		β>3
Bewehrungsstahl	Spannbeton				Stahlbeton
<b>Bewertung</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>9</b>

- Mittelwert bilden (siehe Gleichung 4.12):

$$K_{\text{Instandhaltung}} = \frac{1}{i} \sum_{j=1}^n x_{F,j}$$

Gleichung 4.12 Kriterium Instandhaltung

### (3) Verformung

Der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist in jedem Falle einzuhalten. Um diesen Zustand zu erfüllen und somit die Benutzbarkeit des Bauwerkes zu garantieren, sind die Verformungen in entsprechenden Grenzen zu halten.

#### **Biegeverformung**

- Ermittlung der vorhandenen Durchbiegung je nach statischem System
- Biegeverformungen sind mit entsprechenden Grenzwerten zu begrenzen

#### **Berechnung:**

- Vorhandene und zulässige Verformungen sind mit nachfolgender Gleichung gegenüberzustellen

$$K_{\text{Biegeverformung}} = \frac{f_{\text{zul}} - f_{\text{vorh}}}{f_{\text{zul}}}$$

*Gleichung 4.13: Kriterium Biegeverformung*

#### **Schubverformung**

- Schubverformungsnachweis wird aufgrund der aufwendigen Berechnung nicht durchgeführt
- Die Tragfähigkeit der Verbundfuge ist sicherzustellen
- Verbundfuge ist als schubübertragendes Element (Kopfbolzen, Klebeverbindung) während des Betriebs aufgrund der Lage nicht ersetzbar

#### **Berechnung:**

- Bewertung ist in Abschnitt 7.2.2(3) an einem Beispiel dargelegt

## Längsverformung

- Längsverformungen sind infolge Temperaturänderungen zu erwarten
- Verbundbrücken weisen aufgrund der verschiedenartigen Materialien unterschiedliche Längenänderungsverhalten auf

### **Berechnung:**

- Gegenüberstellung der Längenänderungskoeffizienten der Verbundpartner des Längsträgers sowie des Betondecks

$$K_{\text{Längsverformung}} = \frac{\alpha_{i, \text{Betondeck}}}{\alpha_{i, \text{Längsträger}}}$$

*Gleichung 4.14 Kriterium Längsverformung*

### 4.2.3 Erleben

Im Kriterienkatalog von Eisert [5] wird das Kriterium des Erlebens in die Nebenkriterien Optik und Haptik untergliedert.

#### (1) Optik

Die Bewertung der Optik mit den Einzelkriterien Ablesbarkeit, Lichtführung und Umgebungsbezug ist nur möglich, wenn eine bekannte Gelände- und Bebauungssituation vorliegt. Es ist nicht möglich wie im vorliegenden Fall, eine Bewertung reiner Tragsysteme losgelöst von der Umgebung durchzuführen. Hierbei würde der „Geist des Ortes“ und die Wechselwirkung des Bauwerks mit der Natur komplett vernachlässigt werden.

„Vor dem Entwurf einer Fußgängerbrücke muss die genaue Auseinandersetzung mit den Randbedingungen stehen. Neben den funktionellen Anforderungen an das Bauwerk selbst ... sind es die städtebaulichen Vorgaben und die Integration in eine bestehende Infrastruktur, die den Entwurf beeinflussen. Es macht einen entscheidenden Unterschied, in welchem Umfeld die Brücke gebaut wird.“ ([21], Seite 982)

Der optische Reiz eines Bauwerks hängt sehr stark vom ästhetischen Maß, vgl. Bense [3], ab. Das ästhetische Maß steigt laut Bense mit dem Grad der Ordnung und sinkt mit dem Grad der Komplexität. Somit sind klar gegliederte Objekte vom Betrachter einfacher zu fassen und werden als ästhetischer eingestuft.

Es gibt verschiedene Ansätze, die Ästhetik in Zahlenwerte zu fassen. Zum ersten wäre hier die „Numerische Ästhetik“ genannt. Nach Garnich [7] ist es möglich, für die Ästhetik einen numerischen Wert zu bestimmen. Es muss aber festgehalten werden: „Das ästhetische Maß  $M$  liefert eine objektive Aussage über den strukturellen Aufbau eines Objektes, nicht aber über seine Gestalt. So lassen sich beispielsweise über ein und demselben strukturellen Aufbau verschiedene Gestalten konstruieren, die dasselbe ästhetische Maß besitzen [7] Eine andere Form der numerischen Ästhetikbewertung wurde im Rahmen der Arbeit von Eisert [5] vorgestellt. In den nachfolgenden Abschnitten werden die aufgeschlüsselten Einzelkriterien vorgestellt, welche zur Bewertung he-

rangezogen werden. Die Bewertung erfolgt nicht anhand einer Formel, sondern mit Hilfe einer Skala, vgl. Ablesbarkeit, Lichtführung und Umgebungsbezug.

Des Weiteren spielen die Proportionen bei der ästhetischen Empfindung eine wesentliche Rolle. Selbst der ungeschulte Passant erkennt, ob ein Bauwerk für die gegebene Situation über- bzw. unterdimensioniert ist. Er wird sich bei Bauwerken mit „unüblichen“ Proportionen fragen, wo der Unterschied zu ihm bekannten Bauwerken besteht. Hier zeigt sich wieder die hohe Verantwortung des Planers gegenüber seiner Umwelt (dem Laien). Es müssen Tragwerke gebaut werden, welche einfach zu lesen und zu verstehen sind und somit in Form und Funktion der Aufgabe entsprechen.

Mit Hilfe der in Kapitel 3 vorgestellten Effizienzwertmethode ist es möglich eine Variation der Wichtung vorzunehmen. So besteht auch die Möglichkeit, das Kriterium der Optik nicht mitzubewerten. Dies ist unter Umständen ratsam, wenn man eine reine Studie von Tragsystemen vornimmt und der Umgebungsbezug noch nicht hergestellt werden kann.

### **Ablesbarkeit**

- Die Ablesbarkeit wird durch die Form, die Farbe des Bauwerks, Texturen, die Proportion, die Struktur und das Material beeinflusst.
- Anwendbarkeit dieses Kriteriums, vor allem der einzelnen Parameter, ist im Rahmen einer reinen Tragsystemüberprüfung im Einzelfall zu prüfen

### **Berechnung:**

- Bewertung der einzelnen Parameter

Tabelle 4 Einzelanforderungen der Ablesbarkeit

Form, Farbe, Textur, Proportion, Struktur, Material	nicht der Funktion entsprechend	angemessen	sehr gut der Funktion entsprechend		
<b>Bewertung</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>9</b>

- Mittelwertbildung, mittels:

$$K_{\text{Ablesbarkeit}} = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^n x_{F,i}$$

Gleichung 4.15 Kriterium Ablesbarkeit

### Lichtführung

- Die von Eisert [5] herangezogenen Parameter (Transparenz, Ausrichtung, Durchflutung und Aktive Steuerung) sind für die Begutachtung von Gebäuden heranzuziehen.
- Zur Bewertung einer Brückenkonstruktion kann die Lichtsituation aufgrund des Tragsystems und die optische Wirkung der verwendeten Materialien berücksichtigt werden.
- Somit ist ein geringes Verhältnis von Trägerhöhe zu –breite als positiv zu bewerten. Ebenso ist die Verwendung von einheitlichen Materialien als harmonisch und ästhetisch zu betrachten

### Berechnung:

- Bewertung der einzelnen Parameter

Tabelle 5 Einzelanforderungen der Lichtführung

Trägerhöhe	sehr gering	hoch	sehr hoch		
Trägerbreite	sehr schmal	mittel	sehr breit		
Erscheinung Höhe/Breite	schlank	ausgewogen	gedrungen		
Untersicht- Material	einheitlich	gemischt	viele Materialien		
<b>Bewertung</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>9</b>

- Mittelwertbildung, mittels:

$$K_{\text{Lichtführung}} = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^n x_{F,i}$$

Gleichung 4.16 Kriterium Lichtführung

## Umgebungsbezug

- Die Bewertung des Umgebungsbezuges ist aufgrund, Kapitel 4.2.3(1), der fiktiven Brückensituation und der daraus resultierenden nicht vorhandenen Standortsituation, nicht möglich.

## (2) Haptik

Die Akzeptanz eines Bauwerks hängt stark von dessen Wirkung auf die Nutzer ab.

In diesem Kriterium wird im weitesten Sinne das Wohlbefinden bewertet. Dieses wird durch das Sicherheitsempfinden, das Raumklima und die auftretenden Schwingungen wesentlich beeinflusst.

## Sicherheitsempfinden

- Das Sicherheitsempfinden und somit das Wohlempfinden der Passanten ist durch eine hohe optische Stabilität, sichtbare Brandschutzvorkehrungen und eine Videoüberwachungsanlage zu steigern.
- Aufgrund der Individualität der Nutzergruppe und der daraus resultierenden Sicherheitsauffassung ist eine Befragung zur Bewertung anzustreben.
- Die von Eisert [5] aufgeführten Parameter Beschilderung und Übersichtlichkeit können im Rahmen einer Brückenbewertung vernachlässigt werden.

**Berechnung:**

- Einzelanforderungen sind nach Befragung der Nutzergruppe mit Noten zwischen 1-9 zu bewerten

Tabelle 6 Einzelanforderungen des Sicherheitsempfindens

Opt. Stabilität	wirkt labil		durchschnittlich		massiv
Brandschutz	kein	wenig	teilweise	viel	vollständig
Videoüberwachung	keine	wenig	teilweise	viel	vollständig
Übersichtlichkeit	gering		mittel		hoch
<b>Bewertung</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>9</b>

- Mittelwertbildung, nach:

$$K_{\text{Sicherheitsempfinden}} = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^n x_{F,i}$$

Gleichung 4.17 Kriterium Sicherheitsempfinden

**Schwingung**

- Schwingungen können als störend empfunden werden  
„Eine Studie hat belegt, dass es von Benutzern viel unangenehmer empfunden wird, wenn sich eine schwer wirkende Konstruktion bewegt, als wenn dies eine leichte Konstruktion tut. Das zeigt, dass man viel weniger beunruhigt oder gestört ist, wenn man das spürt und fühlt, was man erwartet.“ ([21], Seite 982)
- Im Extremfall führen Schwingungen zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen und Schädigungen
- Überprüfung des Schwingungsverhaltens ist sehr wichtig, da stark schwingende Konstruktionen vom Benutzer unter Umständen abgelehnt und somit nicht genutzt werden

**Berechnung:**

- Gegenüberstellung der berechneten und zulässigen Schwingungen, nach nachfolgender Gleichung

$$K_{\text{Schwingung}} = \frac{f_{\text{erf}}}{f_{\text{zul}}}$$

Gleichung 4.18 Kriterium Schwingung

**Raumklima**

- Das Kriterium Raumklima wird ausschließlich bei raumbildenden Bauwerken angewandt.

**(3) Akustik**

Die Bewertung des Nebenkriteriums Akustik, mit den Einzelkriterien Raumakustik, Luft- und Körperschall, kann bei Brückenbauwerken entfallen.

## 4.3 Aufwand

Um eine ganzheitliche Bewertung vollziehen zu können ist es wichtig, neben den Kriterien des Nutzens, wie Tragfähigkeit usw., ebenso die Kriterien des Aufwands zu betrachten. Hierbei ist eine Aufteilung in ökonomische und ökologische Belange möglich.

### 4.3.1 Ökonomie

Da die Kosten eines Bauwerks sich nicht nur aus den Planungs- und Herstellungskosten zusammensetzen, ist eine weitergehende Betrachtung der Unterhalts-, Betriebs- und Rückbaukosten wichtig. Nävy [14] und Scheuermann [16] beziffern die Kosten von Hochbauten bis zur Realisierung in einer Größenordnung von ca. 20%. Der Begriff der „Kosten“ wird im Bauwesen anstelle der betriebswirtschaftlichen „Ausgaben“ verwendet, [5].

Da die Kosten und daher der Aufwand direkt in die Bewertung eingehen, hängt die Qualität des Ergebnisses der Effizienzbewertung sehr stark von der vorangestellten Grundlagenermittlung ab.

#### (1) Diskussion der Stahlpreisentwicklung

Während der Verfassung dieser Arbeit kam es im Welthandel zur ersten großen „Stahlkrise“ [28].

Die „rasanten wirtschaftlichen Aufholprozesse in den aufstrebenden Volkswirtschaften dieser Welt, insbesondere in China, haben zu einem weltweiten Stahlboom geführt. Hinzu kommt die kräftige Konjunkturerholung in den USA und in Japan mit entsprechenden Rückwirkungen auf die Stahlmärkte. Stahl ist der Basiswerkstoff für industrielle Entwicklung. Daher werden sich die industriellen Wachstumszonen auch in Zukunft durch eine hohe Stahlverwendung auszeichnen.“ [31]

Neben der angezogenen Konjunktur werden die Stahlpreise durch eine Verknappung auf den Rohstoffmärkten verteuert. „Die Weltmarktpreise für Rohstoffe haben sich seit Beginn 2002 um mehr als 90 Prozent (auf US Dollar Basis) erhöht.“ [31]

Vor dem Hintergrund der starken Nachfrage nach Stahl befinden sich die Produzenten im Aufwind. Dies ist für die momentan schlechte wirtschaftliche Lage in Deutschland nur gut, da knapp 4 Millionen Menschen in Deutschland für Stahlerzeuger, Stahlhandel oder Stahlfabrikanten arbeiten. Im laufenden Jahr (2004) wird die Produktion von Stahl um rund 4 Prozent steigen und für das kommende Jahr sind nochmals 2 Prozent Steigerung zu erwarten. [31]

Aufgrund der anhaltenden Steigerung des Stahlbedarfs in China wird eine baldige Entspannung und somit ein Rückgang des Stahlpreises vorerst nicht zu erwarten sein, siehe Abbildung 2. Hierzu sagte Prof. Ameling bei einer Tagung in Istanbul: "In den kommenden fünf oder sechs Jahren wird der China-Boom nicht umkippen", vgl. [1]. Ein Hauptproblem des Stahlbooms wird die Zeit nach dem Stahlboom sein. In China werden momentan riesige Kapazitäten aufgebaut. Durch die schlechten umweltpolitischen Vorschriften ist es möglich sehr billig zu produzieren. Wenn in China der Bauboom und somit die Nachfrage nach Stahl nachlässt werden die westlichen Stahlproduzenten durch extrem günstige Stahlpreise überrollt werden.

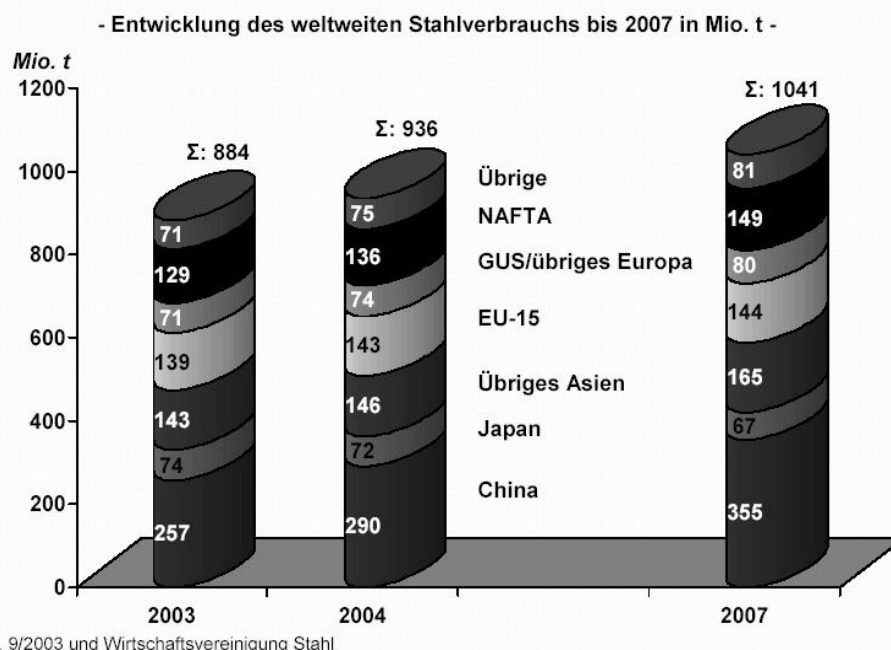


Abbildung 2 Entwicklung des weltweiten Stahlverbrauchs

Anhand der problematischen und schlecht kalkulierbaren Entwicklung auf dem Stahlmarkt erscheint es sinnvoll nach Alternativen zu suchen. Vor diesem Hintergrund ist der Ersatz des Stahls durch GFK eine sinnvolle Konsequenz. Die Kosten für GFK sind momentan zwar höher als die von Stahl, werden aber bei größerer Anwendung und Herstellungsmengen fallen.

Während der Bearbeitung der Studien- und Diplomarbeit hat sich der Stahlpreis folgendermaßen entwickelt:

- Im April 2004 lag der Preis für die Herstellung einer Tonne Stahl inklusive Bearbeitung, Einbau und Transport bei 2400€. Im Dezember des Jahres 2004 betrug der Preis für dieselbe Menge Stahl 3000 – 3500€.

## **(2) Diskussion der GFK – Preisentwicklung**

Die Kosten für glasfaserverstärkte Kunststoffprofile sind derzeit höher als für andere Baustoffe wie Stahl oder Beton. Diese Preisunterschiede sind durch die unterschiedlichen Herstellungsprozesse, die benötigten Rohstoffe und vor allem vom Materialabsatz abhängig (siehe Gesprächsprotokoll, Barefoot [Anhang 2.5]). Durch den momentan geringen Einsatz von GFK im Bauwesen spiegeln sich in den aktuellen Preisen die Innovationskosten (da pultrudierte GFK – Profile ein relativ neuer Werkstoff sind) und die Kosten aufgrund des geringen Absatzes wieder. Wenn es zu einem häufigeren Einsatz kommt, werden die Preise auch aufgrund der Serienfertigung und der hohen Auslastung der Herstellungsbetriebe fallen. Um den soeben geschilderten Fall zu verdeutlichen, folgendes Beispiel (siehe Gesprächsprotokoll, Mann [Anhang 2.2]): In der sächsischen Gemeinde Klipphausen (gelegen zwischen Dresden und Meißen) wurden im Jahre 2002 durch die Elbe-Jahrhundertflut zahlreiche Brücken in Mitleidenschaft gezogen. Eine Sanierung der betroffenen Brücken war nicht möglich. So entschloss man sich neue Brücken zu errichten. Es wurden im Jahre 2004 vier

Fußgängerbrücken in GFK – Bauweise sowie die erste GFK – Fahrbrücke Deutschlands errichtet. Laut Auskunft des Bürgermeisters von Klipphausen (Herrn Mann) wurden die Brücken von einem Planungsbüro entworfen und von einem Hersteller im Paket geordert. Auf diese Weise konnte ein Preis der Brücken erreicht werden, der dem von Stahl- und/oder Betonbrücken gleichzusetzen ist. Des Weiteren können die Folgekosten in Form von Sanierungs- und Instandsetzungsarbeiten als sehr gering beziffert werden. „Die Mehrkosten von GFK gegenüber Stahl amortisieren sich nach 15-30 Jahren“, laut Herrn Bieseke (Fa. Fiberline, Kolding Dänemark),vgl. (siehe Gesprächsprotokoll, Bieseke).

### **(3) Planung**

Eine nicht vermeidbare Kostengruppe verbirgt sich hinter den Kosten der Planung. Die Planungskosten werden nach HOAI für die Leistungsphasen Grundlagenermittlung, Vorplanung, Entwurfsplanung, Genehmigungsplanung und Ausführungsplanung ermittelt. Diese Werte werden im Rahmen der Effizienzwertmethode unter der Kategorie Planungskosten zusammengefasst. Um die Kosten nach HOAI zu ermitteln sind die anrechenbare Kosten heranzuziehen. Die Ermittlung erfolgt nach [11].

### **(4) Herstellung**

Das Eingabefeld „Errichtung“ im Programm Prozedere erfordert die Eingabe der Herstellungskosten. Hierbei handelt es sich um eine Zusammenfassung der Material-, Lohn- und Gerätekosten. Eine Ermittlung erfolgt über eine Massenermittlung unter Zuhilfenahme aktueller Zahlenwerte.

## **(5)    Unterhalt und Betriebskosten**

Die Unterhalts- und Betriebskosten machen im Gegensatz zu den Herstellungskosten den Großteil Gesamtkosten eines (Brücken-) Bauwerks aus, siehe Eisert [5]. Das heißt, die laufenden Kosten übersteigen die Herstellungskosten um ein vielfaches, sind aber nach Fertigstellung nicht mehr zu beeinflussen. Hieraus ergibt sich eine große Verantwortung des Planers in der Planungsphase gegenüber dem Bauherrn und späterem Nutzer.

Als größter Anteil der Kosten ist hierbei die Instandhaltung, die Gewährleistung des Korrosionsschutzes und die Reinigung zu erwähnen. Diese Kosten können durch eine entsprechende Werkstoffwahl reduziert werden. Die Unterhaltungs- und Betriebskosten decken nicht nur Kosten ab, die den ästhetischen Belangen genügen. Sie beinhalten genauso die Kosten für die Sicherung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit.

Um eine genaue Einschätzung dieser Kostengruppe zu garantieren, ist die Diskussion der Lebensdauer des Objektes von entscheidender Bedeutung.

Für die Bewertung ist es von Nöten, die Lohn-, Geräte- und Ausfallkosten für den Unterhalt zu ermitteln. Des Weiteren werden die Personalkosten und Betriebsstoffkosten im Programm Prozedere verarbeitet.

## **(6)    Rückbau**

Vor dem Hintergrund der nachhaltigen Planung und Unterhaltung von Bauwerken müssen auch die Abbruch-, Entsorgungs- und Renaturierungskosten kalkuliert werden. Bei einer Bewertung nach der Effizienzwertmethode werden diese Kosten zu den Rückbaukosten zusammengefasst.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Rückbaukosten nicht bewertet.

### 4.3.2 Ökologie

Im Rahmen der ganzheitlichen Bewertung wird der Begriff der Ökologie synonym zur nachhaltigen Entwicklung verwendet. ([30], Ökologie)

„Nachhaltigkeit ist das Ziel nachhaltiger Entwicklung. Nachhaltige Entwicklung dagegen der Prozess, welcher zu diesem Ziel führt. Vereinfacht und konkret ausgedrückt: Die dauerhafte Existenzfähigkeit der Erde und Ökosysteme ohne Grenzüberziehung, ist zusammen mit der Erfüllung der Grundbedürfnisse aller Menschen und zukünftiger Generationen das eigentliche Ziel von Nachhaltigkeit. Der Weg hierhin ist die nachhaltige Entwicklung aller Bereiche.“ ([30], Nachhaltige Entwicklung)

Seit dem Erdgipfel 1992 in Rio de Janeiro wurde die nachhaltige Entwicklung als internationales Leitprinzip der Staatengemeinschaft anerkannt. Die getroffenen Festlegungen wurden in die Rio Deklaration und die Agenda 21 aufgenommen. Mit Hilfe der Umsetzung der Deklaration soll eine Neuausrichtung der Produktion von Gütern in Industrieländern nachhaltiger gestaltet werden und die Armut in Entwicklungsländern bekämpft werden. Für die Umsetzung setzt sich in Deutschland die lokale Agenda 21 Bewegung ein. ([30], Nachhaltige Entwicklung)

Deutschland verpflichtete sich wie auch 125 weitere Staaten zur Unterzeichnung des Kyoto – Protokolls, somit haben 55% der Staaten weltweit einer „Verringerung des Ausstoßes von so genannten Treibhausgasen“ ([30], Kyotot Protokoll) zugestimmt. (Stand 3.November 2004).

Die umweltpolitischen Ziele der Bundesregierung sind positiv zu betrachten, vor allem im Hinblick auf die Sicherung der Ressourcen und der Umwelt für nachfolgende Generationen. Jedoch weist auch der Stahlverband darauf hin, dass die Regulierung von CO<sub>2</sub> – Ausstößen eine Produktionsbeschränkung zur Folge hat, die Produktionskosten in Deutschland ansteigen, eine Auslagerung der Produktion ins nicht CO<sub>2</sub> – regulierte Ausland fördert und somit die Wettbewerbsfähigkeit des Produktionsstandortes Deutschland gefährdet [1].

Um eine ganzheitliche Bewertung der Ökologie im Rahmen der Effizienzwertmethode durchzuführen ist es notwendig, die Kriterien Ressourcen, Energie und Emissionen zu betrachten. Die Recherche der Daten zur Bewertung stellt das größte Problem bei der ökologischen Bewertung dar, da eine solche Bewertung vor allem im Bauwesen selten durchgeführt und somit wenig Erfahrungswerte vorliegen. Aus diesem Grund sind ermittelte und recherchierte Werte kritisch zu betrachten.

### **(1) Ressourcen**

Wenn man von Ressourcen spricht, ist im Allgemeinen der Verbrauch selbiger gemeint. Unter Ressourcen betrachtet man alle produktions- und lebensbedeutsamen Umweltgüter, vgl. [12]. Unter Ressourcen versteht man somit Rohstoffe, Luft und Wasser.

Mit Hilfe des „ökologischen Rucksacks“ ist es möglich, Angaben zum Bedarf an Rohstoffen der einzelnen Baustoffe bei der Herstellung zu machen. Hierbei werden neben dem tatsächlichen spezifischen Baustoffgewicht alle zur Herstellung erforderlichen Massen berücksichtigt. Somit ist die Möglichkeit für einen ökologischen, ganzheitlichen Vergleich gegeben. Die Datenbeschaffung ist mit spezieller Literatur und der Recherche beim Wuppertal – Institut möglich.

Die Bewertung ist anhand eines Beispiels in Kapitel 6.3.2 einzusehen.

### **(2) Energie**

„Energie ist der Motor unserer Welt.“ ([25], Energie)

Für alle Prozesse von der Herstellung bis zum Abbruch, Recycling und Renaturierung ist es notwendig Energie aufzuwenden. Beim Energiebedarf für die Herstellung wird zwischen verschiedenen Baustoffen unterschieden. Ebenso ist es notwendig den Energiebedarf für die Garantierung der Dauerhaftigkeit gegenüber Umwelteinflüssen zu kal-

kulieren. Die aufzuwendende Energie für die notwendigen Transportvorgänge, sowie der spätere Rückbau und die zugehörigen Recyclingvorgänge des Bauwerks sind einzuplanen. Vor allem beim Recycling können sich große Bedarfsunterschiede auftun, da verschiedene Baustoffe auf unterschiedlich aufwendigem Wege getrennt werden müssen.

Die Anwendung der EWM auf das vorliegende Kriterium erfolgt nach dem Beispiel in Abschnitt 6.3.2.

### **(3) Emission**

Unter Emissionen versteht man den „unerwünschten Ausstoß fester, flüssiger oder gasförmiger Stoffe“, vgl. [12]. Diese „anthropogenen Emissionen“ werden hauptsächlich durch „Autos und andere Verkehrsmittel, die Industrie, Energiewirtschaft...“ ([30], Emission) verursacht. Hieran ist sehr gut zu erkennen, welche weitreichende Auswirkung die Herstellung und der Transport von Baustoffen und somit die Errichtung und Instandhaltung von Bauwerken haben kann.

Zur Bewertung sind analog der vorangegangenen Abschnitte die aufbereiteten MIPS – Werte des Wuppertal – Instituts heranzuziehen.

Die Bewertung erfolgt mit Hilfe einer 1 – 9 Skala. Hierbei sind in entsprechender Weise die zu vergleichenden Varianten einzuordnen.

## 5 Vergleichsbrückenkonstruktionen

### 5.1 Allgemeines

Die Anwendbarkeit der Effizienzwertmethode wird im Rahmen dieser Arbeit anhand eines Vergleiches verschiedener Verbundbrückenkonstruktionen überprüft.

Grundlage dieses Vergleichs stellen vier Verbundbrückenvarianten dar. Diese Varianten wurden in einer vorangegangenen Studienarbeit [9] erarbeitet, statisch durchgebildet und überprüft. Des Weiteren wurden erste Vergleiche und Bewertungen vorgenommen, vgl. Kapitel 9 [9]. Um eine ganzheitliche Bewertung unter Einbeziehung der Nachhaltigkeit zu garantieren, werden die Brücken in dieser Arbeit mit Hilfe der Effizienzwertmethode begutachtet.

Bei den Brückenvarianten in der Studienarbeit [9] handelt es sich um Fußgänger- und Wirtschaftswegbrücken, welche eine Bundesstraße überspannen. Somit haben alle zu untersuchenden Brücken die gleiche Spannweite und Einwirkungssituation. Eine Unterscheidung findet im Querschnitt statt, da verschiedene Materialien Verwendung fanden. Als Ausgangsvariante wurde eine konventionelle Stahl / Beton – Verbundbrücke gewählt. Der Einsatz von GFK im Brückenbau wird insoweit geprüft, dass der Stahllängsträger durch entsprechende GFK – Längsträger ersetzt wird. Neben den Kriterien der Tragfähigkeit wurden die Kriterien der Gebrauchstauglichkeit untersucht. Der Stand der Normung ist im GFK – Bau noch nicht sehr weit vorangeschritten. Aus diesem Grund wurden zur Berechnung Bemessungshilfen der Hersteller [6] verwendet und eine Vergleichsrechnung in Anlehnung an die Verbundbaunorm EC 4 durchgeführt.

## 5.2 Materialkennwerte

In den nachfolgenden Abschnitten werden die für die vier Brückenvarianten verwendeten Materialien vorgestellt. Ebenso wird GFK als Bewehrungsbaustoff vorgestellt. Da es sich um einen, im Bauwesen, neueren Werkstoff handelt wird ein Vergleich zu Stahlbewehrung dargestellt.

### 5.2.1 Betonstahl

Elastizitätsmodul:	$E_s = 210.000 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$
Betonstahlsorte:	<b>BSt 500 S(B)</b>
Nennstreckgrenze:	$f_{sk} = 500 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$
charakt. Zugfestigkeit:	$f_{tk} = 550 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$
Dichte:	$\rho = 78,5 \text{ kN/m}^3$

### 5.2.2 Beton

Elastizitätsmodul:	$E_c = 33.500 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$
Betonfestigkeitsklasse:	<b>C35/45</b>
charakt. Druckfestigkeit:	$f_{ck} = 35 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$
Mittelwert der Zugfestigkeit:	$f_{ctm} = 3,2 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$
Bemessungswert der Druckfestigkeit:	$f_{cd} = 2,33 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$
Dichte:	$\rho = 25 \text{ kN/m}^3$

### 5.2.3 Baustahl

Elastizitätsmodul:	$E_a = 210.000 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$
Stahlgüte:	<b>S 355</b>
Schubmodul:	$G = 81.000 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$
Nennstreckgrenze:	$f_{yk} = 355 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$
charakt. Zugfestigkeit:	$f_{uk} = 510 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$
Bemessungswert:	$f_{yd} = 32,27 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$
Dichte:	$\rho = 78,5 \text{ kN/m}^3$

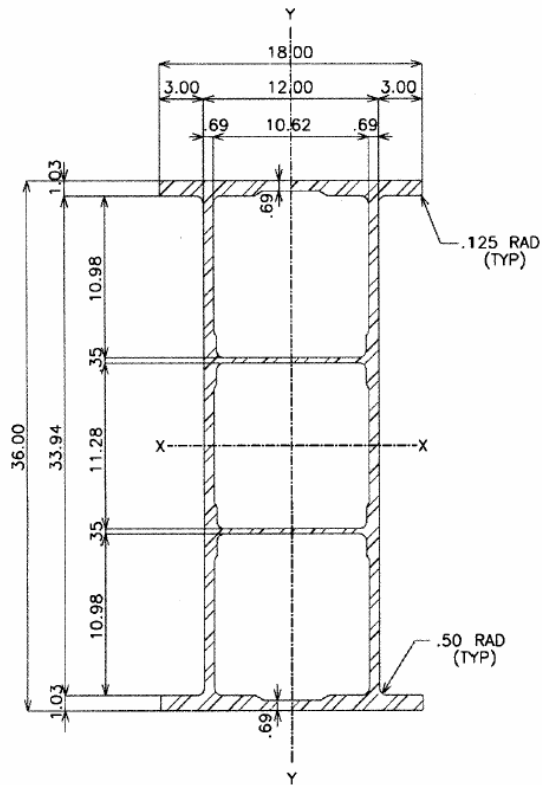
#### 5.2.4 GFK – Pultrusionsprofil als Längsträger

Unter glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) wird ein Mehrkomponentenwerkstoff verstanden, welcher aus der Verbindung von Glasfasern und einer entsprechenden Matrix besteht. Zur Herstellung für die im Bauwesen verwendeten Profile wird im Allgemeinen das Strangziehverfahren (Pultrusion) angewandt. ([9], Kapitel 2.2)

Das für die nachfolgenden Brückenvarianten verwendete EXTREN DWB 36“ Profil wurde von der amerikanischen Firma Strongwell Virginia entwickelt. Hierbei handelt es sich um ein GFK – Pultrusions – Hohlkasten – Profil, welches zur Aussteifung im Inneren durch GFK – Stege verstärkt wird. Des Weiteren sind auf dem Ober- und Unterflansch CFK – Lamellen aufgeklebt. Durch die Verwendung der Kohlefaser – Verstärkung wird der übliche E – Modul von GFK – Pultrusionsprofilen auf ca. das doppelte erhöht.

Neben der Erhöhung des E – Moduls konnte die Torsionssteifigkeit mit Hilfe der CFK – Lamellen erhöht werden.

Elastizitätsmodul:	$E_p$	= 42.000 * 10 <sup>3</sup> kN/m <sup>2</sup>
Schubmodul:	$G$	= 2930 * 10 <sup>3</sup> kN/m <sup>2</sup>
charakt. Zugfestigkeit 0°C:	$f_{t,0°C}$	= 207 * 10 <sup>3</sup> kN/m <sup>2</sup>
Dichte:	$\rho$	= 18 kN/m <sup>3</sup>



## NOMINAL SECTION PROPERTIES

$$I_{xx} = 15291 \text{ in}^4$$

$$S_{xx} = 849 \text{ in}^3$$

$$r_{xx} = 12.9 \text{ in}$$

$$A = 91.2 \text{ in}^2$$

$$A_{2 \text{ webs}} = 50.1 \text{ in}^2$$

$$A_{2 \text{ flanges}} = 34.0 \text{ in}^2$$

$$I_{yy} = 2626 \text{ in}^4$$

$$S_{yy} = 292 \text{ in}^3$$

$$r_{yy} = 5.37 \text{ in}$$

$$\text{Weight} = 70 \text{ lbs/lf}$$

Abbildung 3 Strongwell EXTREN DWB 36" – 914,4mm, Design Guide, Metric Design Information, Seite 22-17

### 5.2.5 GFK – Plankenprofil (SAFPLANK®)

Die Verwendung eines GFK – Plankenprofils im Verbundbrückenbau ist durch mehrere Vorteile gekennzeichnet. Zum Ersten sind keine Schalarbeiten notwendig, da das Plankenprofil als verlorene Schalung eingesetzt wird. Des Weiteren wird die Realisierung des Schubverbundes durch auf dem Profil senkrecht stehende Rippen gewährleistet. Somit ist die Aufbringung von Kopfbolzen oder Profilstäben nicht erforderlich.

Zu dem können die Instandhaltungs- und Betriebskosten reduziert werden, da GFK ein witterungsunanfälliger und korrosionsarmer Baustoff ist und keiner weiteren Schutzmaßnahmen Bedarf.

#### Materialkennwerte

SAFPLANK – Profil (Strongwell Virginia, USA)

$$I = 3.10 \text{ in}^4 = 128.96 \text{ cm}^4$$

$$g = 5.1 \text{ lb/lin. ft} = 7,588 \text{ kg/m}$$

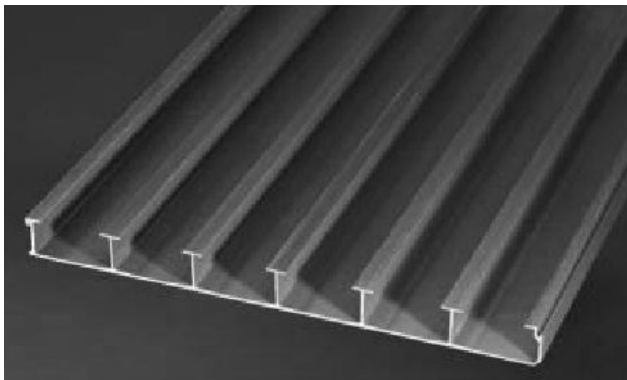


Abbildung 4 SAFPLANK - Profil, Strongwell Virginia, USA

#### Eigenschaften

- Korrosionsresistent
- Einfache Montage
- Einfache Wartung
- Sehr geringes Gewicht

vgl. [24]

### 5.2.6 GFK als Bewehrung und Schubverdübelungselement

Glasfaserverstärkte Kunststoffe weisen eine sehr hohe Resistenz gegenüber den Umweltmedien auf. Somit ist deren Einsatz, als Bewehrungselement oder Kopfbolzenverbindung, zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit eine gute Alternative zur klassischen Stahlbewehrung (Stahlkopfdübel).

In der nachfolgenden Tabelle 7 werden die werkstoffspezifischen Eigenschaften von Betonstahl und GFK – Bewehrungselementen gegenübergestellt. Hierbei werden die Materialdaten von Schöck ComBAR® - Bewehrungsstäben exemplarisch für GFK – Bewehrung herangezogen.

Tabelle 7 Technische Informationen Schöck ComBAR®

Materialkennwerte gerader Stäbe	Betonstahl	Schöck Com- BAR®
	BSt 500 S	D 2002
Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	550	1000
Dehngrenze [N/mm <sup>2</sup> ]	500	1000
empfohlene bzw. zul. Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]	286	250
Dehnung bei Gebrauchslast	0,14%	0,42%
Zug-E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	200.000	60.000
Verbundspannung (bei Versagen) [N/mm <sup>2</sup> ]	15-25	12-20
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	7,85	2,2
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	60	<0,5
Therm. Längenausdehnungskoeff. $\alpha$ [ $10 \cdot K^{-1}$ ]	10	6(axial), 22(radial)

Anwendungsregeln zum Einsatz von GFK als Bewehrung und spezifische Eigenschaften der Schöck ComBAR® - Bewehrung sind im Anhang unter Kapitel 1 zusammengefasst. [19]

### 5.2.7 Klebeverbindung

Eine dem Werkstoff GFK entsprechende Verbindungstechnik stellt die Klebeverbindung dar.

„Kleben ist unlösbares stoffschlüssiges Verbinden von gleichen oder verschiedenartigen Werkstoffen mit Hilfe eines Klebstoffes (nichtmetallischer Stoff).“ [8]

Anwendung von Klebeverbindungen: [4]

- Verbinden von Konstruktionsteilen
- sichern von Schrauben
- Dichten von Fügeflächen

Somit besteht die Möglichkeit die GFK – Längsträger mit den SAFPLANK – Profilen der Variante Nr. 3 (Kapitel 5.3.3) und die GFK – Träger mit den Betonfiligranplatten der Variante Nr. 4 (Abschnitt 5.3.4) kraftschlüssig zu vereinigen.

#### **Eigenschaften von Klebstoffsystemen auf Polyurethan- oder Epoxidharzbasis:**

- Zugfestigkeit: 13.7 – 17.2 MPa = 13,7 – 17,2 N/mm<sup>2</sup>
- E – Modul: 482.7 – 620.6 MPa = 482,7 – 620,6 N/mm<sup>2</sup>

Verformungsfestigkeit: 75 – 100% (die Klebeverbindungen verformen sich maximal auf  $\frac{3}{4}$  der Ausgangsform)  
[10]

### 5.3 Vergleichsbrückenüberblick

In den Abschnitten 5.3.1 - 5.3.4 werden die vier zu vergleichenden Vorzugsvarianten der Studienarbeit [Heidenreich] vorgestellt. Diese Varianten wurden aus insgesamt 16 Vergleichsbrücken aus [9] ausgewählt. Des Weiteren wird in Abschnitt 5.3.5 eine fünfte Variante vorgestellt. Hierbei handelt es sich um eine Abwandlung der Variante 2 hin zu einer reinen GFK(Träger und Bewehrung) / Beton(Betondeck) Variante.

Folgende Parameter sind für alle zu vergleichenden Brücken als identisch anzunehmen:

- Fußgänger- und Wirtschaftswegbrücke
- Überspannung einer Bundesstraße
- Spannweite 18m
- Einwirkungen aus Fußgänger und Wirtschaftswegverkehr
- Brückenausrüstung
- Brückenbreite
- Statisches System

#### Ansicht

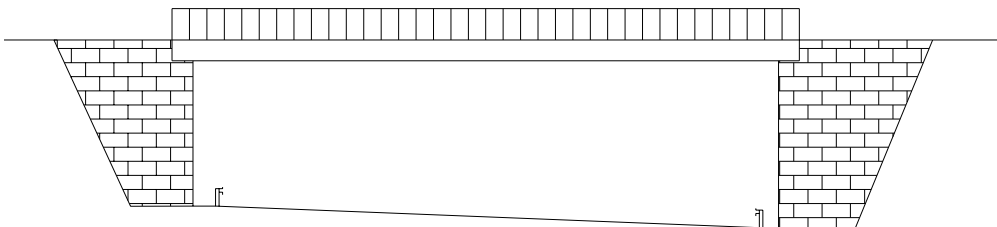


Abbildung 5 Brückenansicht

### 5.3.1 Variante 1 – Stahl/Beton-Verbundbrücke

#### Konzept

Brückenvariante 1 stellt eine konventionelle Stahl/Beton – Verbundbrücke dar. Die Brücke wurde so dimensioniert, dass sie alle an sie gestellte Anforderungen erfüllt. Hierzu gehören die Kriterien der Tragfähigkeit (Biege- und Schubtragfähigkeit) sowie die Kriterien der Gebrauchstauglichkeit (Durchbiegung und Schwingungsverhalten).

#### Materialien:

Beton: C35/45

Betonstahl: BSt500S

Baustahl: S355

#### Querschnittswerte:

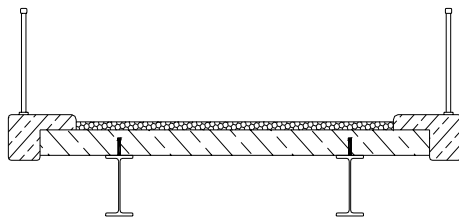


Abbildung 6 Querschnitt; Variante Nr. 1

Trägeranzahl: 2

Trägermaterial: Stahl, IPB 600

Trägerabstand: 2,55m

Trägerhöhe: 0,60m

Betondeckhöhe: 0,25m

**Gesamthöhe: 0,85m**

### **Statisches System und Modell**

Diese Brückenvariante ist als Einfeldträgerbrücke mit zwei Stahllängsträgern konzipiert. Zur Herstellung des Schubverbundes zwischen Längsträgern und Betondeck werden Kopfbolzen auf die Stahlträger, im Hubzündungsverfahren, aufgeschweißt. Die Lagerung erfolgt auf den Widerlagern unter Verwendung von Verformungslagern.

Die Stahlträger werden mit 18m Länge als Sondertransport auf die Baustelle transportiert. Nachdem die Unterstützung gestellt und geschalt wurde, wird das 25cm starke Betondeck vor Ort hergestellt. Nach dem Ausschalen ist eine entsprechende Nachbehandlung der Betonflächen vorzusehen.

### **Vorteile im Überblick:**

- Konventionelles Brückensystem, somit geringe Fehleranfälligkeit im Herstellungsprozess
- Geringe Durchbiegungen
- Einfache Herstellung der Verbundwirkung
- Dem Passanten bekannte optische Erscheinung

### **Nachteile im Überblick:**

- Hohes Transportgewicht
- Hohe Instandhaltungs- und Betriebskosten aufgrund der hohen Korrosionsanfälligkeit der Stahlträger und Verwitterung der Betonflächen

### 5.3.2 Variante 2 – GFK/Beton-Verbundbrücke

#### Konzept

Vergleichsbrückenvariante Nr. 2 stellt eine dem klassischen Verbundbrückenbau angelehnte GFK – Lösung dar. Hierbei wurden statt der Stahlträger GFK – Träger eingesetzt. Des Weiteren ist die schubverbindende Tragwirkung zwischen Längsträger und Betondeck den Gegebenheiten angepasst worden.

#### Materialien:

Beton: C35/45

Träger: Glasfaserverstärkte Kunststoffprofile

#### Querschnitt:

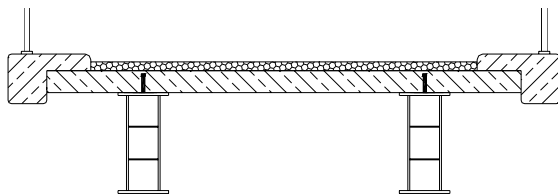


Abbildung 7 Querschnitt; Variante Nr.2

#### Detail (Profilstäbe):

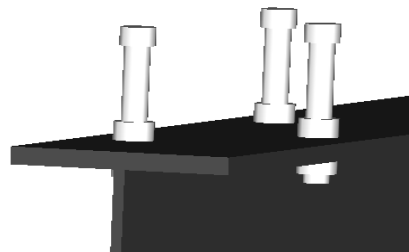


Abbildung 8 Profilstäbe

Trägeranzahl: 2

Trägermaterial: GFK – Pultrusionsprofil,  
EXTREN – DWB 36“ (Strongwell)

Trägerabstand: 2,55m

Trägerhöhe: 0,91m

Betondeckhöhe: 0,25m

**Gesamthöhe: 1,16m**

### **Statisches System und Modell**

Brückenvariante Nr. 2 ist als Einfeldträgerbrücke ausgeführt. Die GFK – Längsträger werden mit dem Betondeck schubfest verbunden. Hierzu werden Stahlprofilstäbe in die GFK – Träger eingeschraubt. Die Längsträger werden auf Verformungslagern aufgelagert.

Der Transport der Träger ist aufgrund der Länge von 18m als Sondertransport durchzuführen. Für den Einbau der GFK – Hohlkastenträger sind aufgrund des geringen Gewichts nur kleine Krane von Nöten. Vor Ort ist nach dem Einheben der Träger eine Unterstützung zu stellen, die Schalung einzubauen und der Beton einzubringen. Nach Fertigstellung des Betondecks sind entsprechende Nachbehandlungsarbeiten durchzuführen.

### **Vorteile im Überblick:**

- Geringes Transportgewicht
- Keine Korrosionsanfälligkeit der Träger
- Kleine Krane zum Einheben der Träger notwendig

### **Nachteile im Überblick:**

- Hoher Verbundherstellungsaufwand
- Dem Passanten ungewohnt hohe Träger (~1/3 höher als Stahlträger)

### 5.3.3 Variante 3 – GFK/Beton-Verbundbrücke + SAFPLANK®

#### Konzept

Variante Nr. 3 stellt eine materialgerechte GFK – Lösung dar. Neben dem Einsatz von GFK – Längsträgern wird ein GFK – Plankenprofil (SAFPLANK) auf diese aufgeklebt. Auf diese Weise wird der Schubverbund zwischen GFK – Längsträger und Betondeck, sowie eine verlorene Schalungsebene realisiert.

#### Materialien:

Beton: C35/45

Träger: Glasfaserverstärkte Kunststoffprofile

#### Querschnitt:

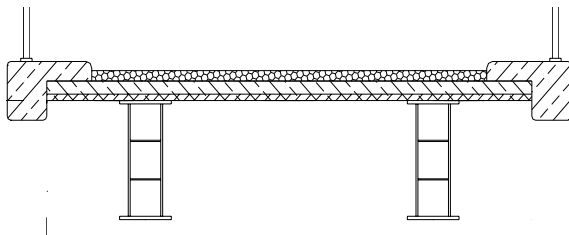


Abbildung 9 Querschnitt; Variante Nr. 3

Trägeranzahl: 2

Trägermaterial: GFK – Pultrusionsprofil,  
EXTREN – DWB 36“ (Strongwell)

Trägerabstand: 2,55m

Trägerhöhe: 0,91m

Betondeckhöhe: 0,15m (einschl. SAFPLANK – Profil)

**Gesamthöhe: 1,06m**

### **Statisches System und Modell**

Brückenvariante Nr. 3 stellt eine gerade Einfeldbrücke dar. Der Schubverbund zwischen GFK – Längsträger und Betondeck wird mit Hilfe von aufgeklebten SAFPLANK – Profilen realisiert. Hierbei ist die Verbindung zwischen Träger und Plankenprofil eine Klebeverbindung, mittels Zwei – Komponenten – Klebesystem. Die Schubübertragung zwischen Betondeck und SAFPLANK – Profil wird über senkrecht stehende Rippen gewährleistet. Die Längsträger liegen auf Verformungslagern auf.

In der Betondeck/SAFPLANK – Konstruktion übernimmt das Plankenprofil die Zugkräfte in Querrichtung. Die GFK – Längsträger tragen die Zugkräfte in Längsrichtung ab. Das Betondeck nimmt die Druckkräfte der Konstruktion auf.

Der Transport der GFK – Träger mit aufgeklebten SAFPLANK – Profilen ist aufgrund der Länge als Sondertransport durchzuführen. Zum Einbau der Träger samt Plankenprofilen ist ein kleiner Kran ausreichend. Nach dem stellen der Unterstützung ist der Einbau des Betons möglich. Zusätzliche Schalarbeiten sind durch die verlorene GFK – Schalung nicht notwendig.

### **Vorteile im Überblick:**

- Innovativste und werkstoffgerechteste Variante
- Geringes Transportgewicht
- Keine Korrosionsanfälligkeit der Träger
- Glatte und geschlossene GFK – Untersicht

### **Nachteile im Überblick:**

- Klebefuge zur Verbundherstellung, im Bauwesen derzeit ungewöhnlich
- Dem Passanten ungewohnt hohe Träger
- Teuerste Konstruktion

### 5.3.4 Variante 4 – GFK/Beton-Verbundbrücke + Filigranplatte

#### Konzept

In Brückenvariante Nr. 4 wird eine Filigranplatte als Schalung verwendet. Somit wird der Vorfertigungsgrad erhöht und das Transportgewicht relativ gering gehalten. Die Verbindung zwischen GFK – Träger und Filigranplatte wird mittels einer Klebeverbindung realisiert.

#### Materialien:

Beton: C35/45

Betonstahl: BSt500S

Träger: Glasfaserverstärkte Kunststoffprofile

#### Querschnitt:

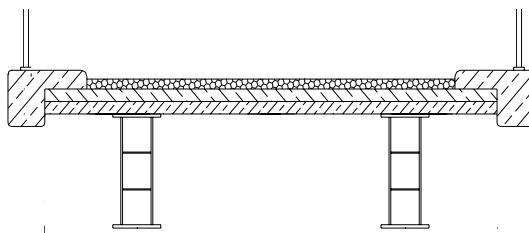


Abbildung 10 Querschnitt; Variante Nr. 4

Trägeranzahl: 2

Trägermaterial: GFK – Pultrusionsprofil,  
EXTREN – DWB 36“ (Strongwell)

Trägerabstand: 2,55m

Trägerhöhe: 0,91m

Betondeckhöhe: 0,20m

**Gesamthöhe: 1,11m**

### **Statisches System und Modell**

Diese Brückenvariante wird als Einfeldträgerbrücke ausgeführt. Die Längsträger liegen auf Verformungslagern auf. Der Schubverbund zwischen Filigranplatte und GFK –Profil wird mit einem Mehrkomponenten – Klebesystems realisiert. Der Schubverbund zwischen Filigranplatte und Neubeton wird über Anschluss- und Querbewehrung erreicht.

Durch die Länge der Träger ist der Transport als Sondertransport anzunehmen. Beim Einheben der Träger, samt Filigranplatte, ist aufgrund des Gewichts ein schwerer Kran anzunehmen. Der Einbau des Betons ist nach dem Stellen der Unterstützung möglich. Zusätzliche Beton-nachbehandlungsarbeiten sind auf der Baustelle aufgrund der vorgefertigten Filigranplatte nicht notwendig.

### **Vorteile im Überblick:**

- Keine Korrosionsanfälligkeit der Träger
- Hoher Vorfertigungsgrad
- Glatte Untersicht durch Sichtbeton – Filigranplatten
- Keine Nachbehandlung der Filigranplatte auf der Baustelle

### **Nachteile im Überblick:**

- Hoher Verbundherstellungsaufwand
- Dem Passanten ungewohnt hohe Träger
- Großer Kran notwendig
- Bearbeiten der Filigranplatte vor Klebearbeiten, bis auf erste Tragfähige Schicht Sandstrahlen

### 5.3.5 Variante 5 – GFK/Beton - Verbundbrücke (GFK - Bewehrung)

#### Konzept

Vergleichsbrückenvariante Nr. 5 ist eine Abwandlung der Brückenvariante Nr. 2. Hierbei werden die in das GFK – Profil eingeschraubten Stahlprofilstäbe durch GFK – Stäbe ersetzt. Des Weiteren wird die statisch notwendige Plattenbewehrung durch GFK – Bewehrung ersetzt. Somit wird eine sehr stark dem klassischen Stahl/Beton – Verbundbrückenbau angelehnte Variante in GFK – Bauweise realisiert.

Diese Variante verdeutlicht die Einsatzmöglichkeit von GFK für sämtliche Bauteile im Verbundbrückenbau. Da keine statischen Berechnungen zu diesem Entwurf durchgeführt wurden, wird diese Brücke nicht in die nachfolgenden vergleichenden Bewertungen mit aufgenommen.

#### Materialien:

Beton: C35/45

Bewehrung: Schöck ComBAR®

Träger: Glasfaserverstärkte Kunststoffprofile

#### Querschnitt:

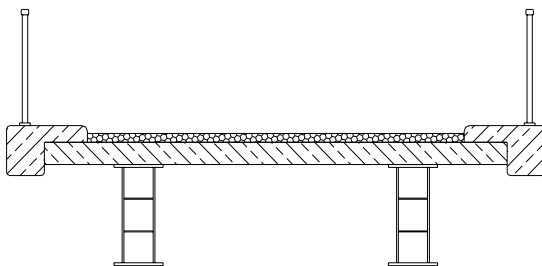


Abbildung 11 Querschnitt; Variante Nr.5

## **6 Beiwertermittlung**

### **6.1 Allgemeines**

Die Bewertung nach der Effizienzwertmethode wird in die Bewertung des Nutzens und des Aufwands untergliedert. Um eine genaue Wertung durchführen zu können, ist eine exakte Ermittlung der Beiwerte der einzelnen Kriterien anzustreben. In den nachfolgenden Kapiteln wird die Herkunft der Beiwerte für die Kriterien des Nutzens und Aufwands erläutert.

### **6.2 Beiwerte der Bewertung des Nutzens**

Zur Ermittlung des Nutzens nach dem in Kapitel 4 vorgestellten Kriterienkatalog sind hauptsächlich Werte zum Nachweis der Tragfähigkeit sowie der Gebrauchstauglichkeit notwendig. Diese Werte sind in der vorangegangenen Studienarbeit [9] zu finden. Für die Bewertung der nicht berechenbaren Faktoren wie die Kriterien der Dauerhaftigkeit ist es notwendig, neben der Material- auch die Geometrieparameter der Brücke zu kennen. In beiden Fällen, die berechenbaren Größen sowie die einschätzbaren Größen, ist den Bewertungstabellen im Kapitel 7 eine Spalte der Datenherkunft zugeführt. Mit Hilfe dieser Bezeichnung lässt sich die Quelle dieser Werte bzw. die Angaben zur Geometrie ausnahmslos in [9] recherchieren.

### 6.3 Beiwerte der Bewertung des Aufwands

Die Bewertung des Aufwands untergliedert sich, wie in Kapitel 4 dargestellt, in die Kriterien Ökonomie und Ökologie. Die Recherche der Beiwerte zur Bewertung dieser Kriterien erweist sich viel schwieriger als die Beiwerte zur Bewertung des Nutzens.

Der Großteil der Daten zur Ökonomie ist von Instituten und Firmen zu beziehen. Die Qualität und Genauigkeit vor allem aber Aktualität der Daten ist bei Firmen und Instituten unterschiedlich zu werten. Die Institute wie Universitäten geben Datenmaterial bereitwillig zur weitergehenden Nutzung an Bearbeiter. Diese Daten sind aufgrund ihrer häufig nicht allzu großen Aktualität vorsichtig zu bewerten. Dies ist bedingt durch die Eigenrecherche der Institute und den damit verbundenen Zeitverzug. Demgegenüber haben Firmen als Anwender und Praktiker Zugang zu sehr aktuellem Datenmaterial. Da Firmen aber im ständigen Konkurrenzkampf stehen, ist die Bereitwilligkeit Planer und Forscher mit Daten zu versorgen meist sehr beschränkt.

Benötigtes Datenmaterial zur Bewertung der Ökologie ist ebenso schwer zu recherchieren. Dieser Fakt wird bedingt durch die noch nicht weit verbreitete ökologische Betrachtung von Bauprozessen. Hier ist die Unterstützung der Industrie in besonders großem Maße relevant, da nur sie Daten über die tatsächlich vorhandenen Bauprozesse ermitteln können. Diese Zusammenarbeit ist aus finanziellen Gründen nicht sehr weit fortgeschritten, da die Industrie entsprechende Datenaufnahmen eigenständig organisieren und somit finanzieren muss. Das Wuppertal Institut veröffentlichte MIPS – Werte [MIPS – Werte: Anhang Kapitel 3] für verschiedene Prozesse im Bauwesen und der Industrie. Doch auch dieses Institut ist auf die Zuarbeit der Industrie angewiesen.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die recherchierten Beiwerte der Kriterien Ökonomie und Ökologie dargestellt.

### 6.3.1 Ökonomie

Die Beiwerte zur Ermittlung der Ökonomie wurden in der Literatur, bei Instituten und Firmen recherchiert. In den folgenden Abschnitten werden die ermittelten Angaben dargelegt, hierzu zählen die Planungs-, Herstellungs-, Unterhalts-, Betriebs- und Rückbaukosten.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Brückennutzungszeitraum von 100 Jahren betrachtet, nach Lünser [12] sind ein Zeitraum von 90 Jahren  $\pm$  33% ein realistischer Bestandszeitraum. Es besteht auch die Möglichkeit die Lebensdauer theoretisch infolge dynamischer Beanspruchung zu berechnen. Häufig werden Brücken aber infolge:

- geänderter Anforderungen
- Stilllegung des Verkehrsweges
- Instandhaltungsmängel
- äußere Einwirkungen

vorzeitig stillgelegt bzw. abgerissen, vgl. Lünser [12].

#### (1) Planungskosten

Die Planungskosten werden gemäß DIN 276 und nach HOAI ermittelt. Es werden die anrechenbaren Kosten für den Bauwerksbau ermittelt und die einzelnen Leistungsphasen entsprechend honoriert. Die Verbundbrückenkonstruktionen werden als Ingenieurbauwerke betrachtet und in Honorarzone II eingestuft, da es sich um gerade Einfeldbrücken handelt, vgl. [11] Das Honorar für die Objektplanung wird nach §55, vgl. (Tabelle 54; Anhang 4) zu §56. Die Tragwerksplanung wird nach §64 mit Honorartafel zu §65 durchgeführt, siehe hierzu (Tabelle 55 Anhang 4).

## (2) Herstellungskosten

Zur Ermittlung der Herstellungskosten wurden realistische und möglichst aktuelle Kosten von Instituten und Firmen erfragt und recherchiert. In der nachfolgenden Tabelle 8 ist eine Zusammenstellung dieser Werte aufgeführt.

Die Kosten für Stahl- wie auch für GFK – Profile sind als Großabnehmerpreise zu bezeichnen. Die Kosten für Stahlprofile wurden in Gesprächen mit deutschen Baufirmen in Erfahrung gebracht. Die GFK – Profilkosten konnten mit Hilfe einer amerikanischen Pultrusionsprofilfirma recherchiert werden. Im Anhang ist eine Gegenüberstellung der Kosten von GFK – Profilen für Abnehmer, sowie für Großkunden dargestellt, vgl. Kapitel A-2.5.

Tabelle 8: Herstellungskosten in Euro, Baustoffe und Einbau Bauteile

Pos.	Beschreibung	Datenquelle	Einheit	EP
<b>1</b>	<b>Herstellungs- und Einbaukosten</b>			
<b>1.1</b>	<b>Beton</b>			
<b>1.1.1</b>	<b>Beton der Klasse C35/45 herstellen</b>		m <sup>3</sup>	
	Herstellung, Transport, Einbau, Bewehrungsstahl	Baufirma		113,00
<b>1.2</b>	<b>Baustahl</b>			
<b>1.2.1</b>	<b>Walzprofilstahl S355 herstellen, liefern, einbauen</b>		t	
	Herstellung 2x18m HEB 600, Einbau, incl. Transport			3.500,00
<b>1.3</b>	<b>GFK - Längsträgerprofile</b>			
<b>1.3.1</b>	<b>GFK - Profile herstellen</b>		t	
	Herstellung 2x18m Strongwell Extren DWB	Strongwell		7.967,36
<b>1.3.2</b>	<b>GFK - Profil Einbau</b>		t	
	Einbau der GFK - Profile, incl. Transport	Strongwell		1.000,00
<b>1.4</b>	<b>GFK - SAFPLANK Profile</b>			
<b>1.4.1</b>	<b>SAFPLANK - Profile herstellen</b>	[H] Kap.9.3.2	m <sup>2</sup>	
	Profil herstellen			53,00
<b>1.4.2</b>	<b>SAFPLANK - Profile Einbau</b>		m <sup>2</sup>	
	Profil einbauen, incl. Transport auf Baustelle	[Brückenbau Uni Weimar]		50,00
<b>2</b>	<b>Schalungskosten</b>			
<b>2.1</b>	<b>Schalung Beton</b>		m <sup>2</sup>	
	Schalung errichten, vorhalten und entfernen	[H] Kap.9.3.2		140,00
<b>2.2</b>	<b>Schalung vorhalten</b>		Tage	
	Kosten der Schalung pro Tag			

<b>3</b>	<b>Brückenausrüstung</b>	[Brückenbau Uni Weimar]		
<b>3.1</b>	<b>Verformungslager</b>		Stück	
	Verformungslager Lieferung und Einbau			808,03
<b>3.1.1</b>	<b>Fahrbahnübergangskonstruktion</b>		lfd. m	
	Fahrbahnübergangskonstruktion Lieferung und Einbau			705,87
<b>3.1.2</b>	<b>Geländer</b>		lfd. m	
	Geländer herstellen, Transport, Einbau			114,82
<b>3.1.3</b>	<b>Kappen</b>			
	incl. Schalung		m <sup>3</sup>	301,27
<b>3.1.4</b>	<b>Brückenablauf</b>		Stück	
				540,09
<b>3.1.5</b>	<b>Abflussleitung</b>			
			m	93,90
<b>4</b>	<b>Brückenbelagsarbeiten</b>	[Brückenbau Uni Weimar]		
<b>4.1</b>	<b>Fahrbahnbelag</b>		m <sup>2</sup>	
	8 cm Fahrbahnbelag einbringen, incl. Transport			19,57
<b>4.2</b>	<b>Oberfläche versiegeln</b>		m <sup>2</sup>	
	Oberfläche Druckluftstrahlen			2,19
<b>4.3</b>	Oberfläche Epoxydharzversiegelung			9,90
<b>4.4</b>	Schweißbahnaufbringung			30,28
<b>4.5</b>	<b>Schrammbord</b>		m <sup>3</sup>	
	Schrammbord einbringen			301,27

### (3) Unterhalt / Betrieb

Um die Unterhalt- und Betriebskosten bewerten zu können, wird im Rahmen dieser Arbeit die Instandhaltung der Brücken betrachtet. Die Brückeninstandhaltung wird durch Überwachung- und Wartungsarbeiten charakterisiert.

Brücken als wesentliche Objekte der Verkehrsinfrastruktur müssen zur Gewährleistung einer hohen Lebensdauer regelmäßig gewartet werden. Die Instandhaltung von Brücken ist vom Baulastträger gemäß DIN 1076 durchzuführen. Die Instandhaltungsarbeiten sind in die Bauwerksunterhaltung und die Bauwerksüberprüfung zu unterteilen, siehe Abbildung 12.

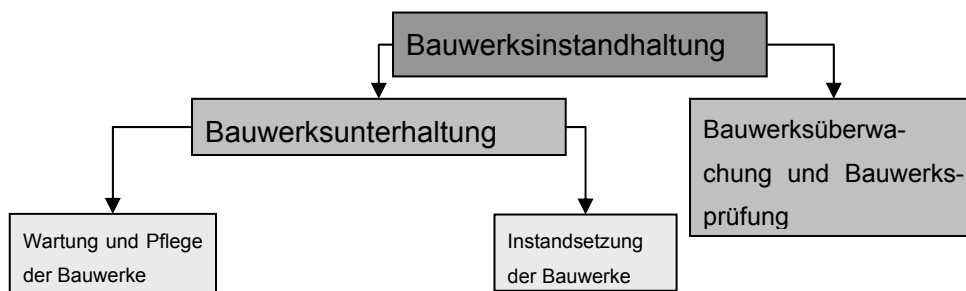


Abbildung 12 Bauwerksinstandhaltung [29]

Bei der Bauwerksinstandhaltung und somit der Bauwerksprüfung von Verbundbrücken sind nicht nur die einzelnen Bauteile (massives Brückendeck und Längsträger) entsprechend ihrer werkstoffspezifischen Eigenschaften zu überprüfen. Ein Hauptaugenmerk der Prüfung muss immer auf der Verbundfuge ruhen. Da die Verbindungsmittel (Dübel, Kopfbolzen oder Klebeverbindung) nicht sichtbar sind, muss man anhand von Rissbildern und anderen Anhaltspunkten versuchen, das Tragverhalten einzuschätzen, vgl. [29]

### Kosten der Bauwerksinstandhaltung

Die Kosten für die Bauwerksinstandhaltung differenzieren sich nach Abbildung 12 in die Kosten für die Bauwerksunterhaltung und die Kosten für die Bauwerksüberwachung.

#### (1) Aufgaben und Häufigkeiten der Bauwerksprüfung

Die Kosten für die Prüfung resultieren aus den Kosten für die städtischen Angestellten, den freischaffenden Prüfingenieuren und den Verwaltungskosten (Führen des Bauwerksbuches). Die Kosten sind abhängig von der Brückenfläche, vgl. [29]). Somit ist die Prüfung einer großen Brücke kostenintensiver. Da im Rahmen dieser Arbeit die Brückenfläche nicht variiert wird, wird von gleichen Kosten ausgegangen. Die Kosten sind nur von den vorgegebenen Intervallen (siehe Übersicht 1) abhängig.

Prüfintervalle für Brückentragwerke:

- ⇒ Hauptprüfungen
  - Vor der Bauabnahme
  - Vor Verstreichen des Gewährleistungszeitraumes
  - Danach in jedem 6. Jahr
- ⇒ Einfache Prüfungen
  - 3 Jahre nach jeder Hauptuntersuchung
- ⇒ Prüfung aus besonderem Anlass
  - Nach Bauwerksbeeinflussenden Ereignissen (z.B. Unfall)
  - Ersetzt keine Haupt- oder Einfache Prüfung

*Übersicht 1 vgl. DIN 1076*

(2) Aufgaben der Bauwerksunterhaltung

Die anfallenden Unterhaltungsmaßnahmen sind laut [29] in Wartungsmaßnahmen und Sofortmaßnahmen zu unterteilen.

Zu den Wartungsmaßnahmen zählen:

- Reinigung tausalzbelasteter Konstruktionsteile
- Regelmäßige Reinigung der Entwässerung
- Wartung der beweglichen Teile
- Zurückschneiden bzw. Entfernen von Bewuchs

Sofortmaßnahmen umfassen:

- Maßnahmen aus den Bauwerksprüfungen
- Beseitigung aus Unfallschäden
- Belagsreparatur im Rahmen der Verkehrssicherungspflicht
- Kleinere Reparaturen an den Verschleißteilen wie Lager und Übergänge

„Bei konsequenter Durchführung der ... beschriebenen Präventivmaßnahmen wie Korrosionsschutz, Belagserneuerung, Betoninstandsetzung und Instandhaltung der Übergangskonstruktionen können Sofortmaßnahmen auf ein Minimum reduziert werden.“ [29]

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Kosten der Präventivmaßnahmen betrachtet, da die Kosten infolge von Unfällen im Einzelfall betrachtet werden müssen.

## (3) Kosten der Präventivmaßnahmen

- Korrosionsschutz

Um der neuen Schutzsysteme gerecht zu werden, werden kurz-periodische Erneuerungsintervalle gewählt.

Die erste Ausbesserung erfolgt nach 15 Jahren, hierbei sind maximal 7% der Beschichtungsfläche auszuflecken.

Die zweite Ausbesserung erfolgt nach weiteren 10 Jahren, nun sind 10% auszuflecken und eine komplett neue Deckbeschichtung aufzubringen. Die entstehenden Kosten belaufen sich auf das 1,6 fache der ersten Ausbesserungsmaßnahme.

Nach weiteren 20 Jahren (45 Jahre nach Inbetriebnahme) muss das gesamte Korrosionsschutzsystem erneuert werden. Es ist mit den 4,25 fachen Kosten der ersten Erneuerungsmaßnahme zu rechnen. Hiermit ist die Brücke vor Korrosion geschützt wie am Anfang, somit beginnt der Turnus der Instandhaltung wieder von neuem.

$X_k = 20,45 \text{ €/m}^2$  Brückenfläche (Straßenbauamt Düsseldorf)

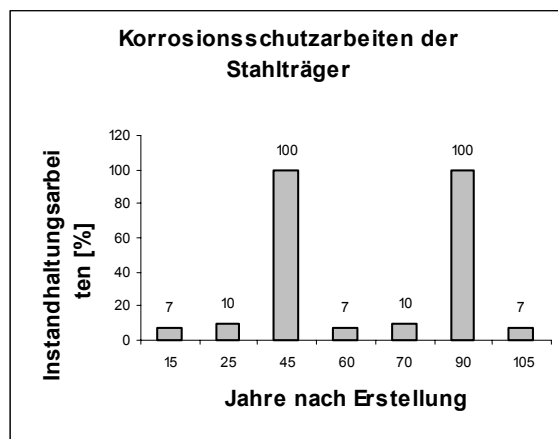


Abbildung 13 Korrosionsschutzmaßnahmen

- Instandsetzung und Erneuerung der Beläge

Die 1. Erneuerung des Belages, hierbei werden 12% der Deck- und Schutzschicht und 5% der Dichtungsschicht nach 10 Jahren ausgebessert.

Der 2. Wartungsintervall findet nach 15 Jahren statt, es werden 50% der Deck- und Schutzschicht und 12% der Dichtungsschicht erneuert. Es muss mit den 2,8 fachen Kosten der ersten Wartung gerechnet werden.

Nach insgesamt 25 Jahren wird die Erneuerung der gesamten Deck- und Schutzschicht sowie 50% der Dichtungsschicht nötig. Hierbei muss mit den 6fachen Kosten der ersten Wartung gerechnet werden.

$X_{\text{Bel}} = 8,69 \text{ €/m}^2$  Brückenfläche (Straßenbauamt Düsseldorf)

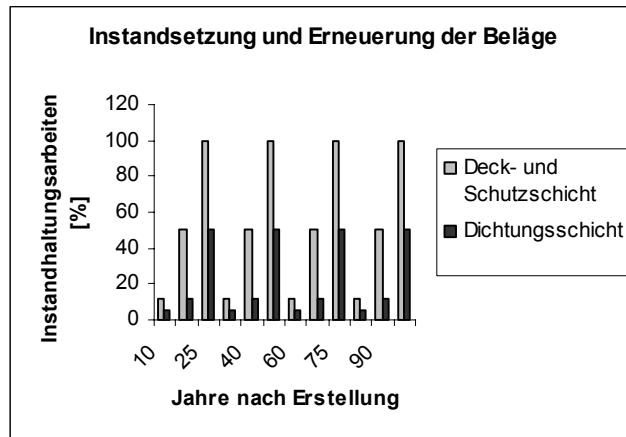


Abbildung 14 Instandsetzung und Erneuerung der Beläge

- Instandsetzung der Betonoberflächen

Langjährige Untersuchungen haben ergeben, dass eine erste Ausbesserung der Betonflächen nach 20 Jahren nötig ist. Zu diesem Zeitpunkt sind ungefähr 3% der Betonflächen auszubessern. Des Weiteren müssen 10% durch eine Beschichtung geschützt werden.

Nach weiteren 20 Jahren steigen der Ausbesserungsanteil auf 11% und der neu zu beschichtende Anteil auf 15%, es ist mit den 2fachen Kosten der ersten Instandsetzung zu rechnen.

60 Jahre nach Inbetriebnahme der Brücke müssen 18% ausgebessert und 25% neu beschichtet werden. Die Kosten für diese Maßnahme sind mit den 2,6fachen Kosten der ersten Ausbesserung anzusetzen.

$X_B = 15,34 \text{ €/m}^2$  Brückenfläche (Straßenbauamt Düsseldorf)

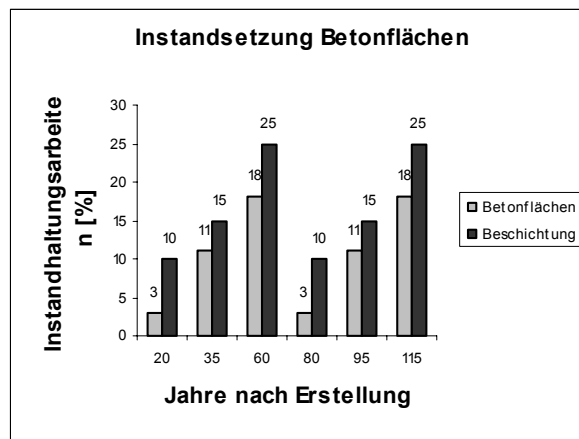


Abbildung 15 Instandsetzung Betonflächen

- Instandsetzung und Erneuerung der Fahrbahnübergänge

Um Behinderung im Straßenverkehr zu vermeiden, werden diese Maßnahmen im Zuge von größeren Belagsarbeiten somit alle 20 Jahre durchgeführt.

Die Kosten steigen über die Jahre nicht an, da von Anfang an ein kompletter Austausch vorgesehen ist.

$X_{\bar{U}} = 12,78 \text{ €/m}^2$  Brückenfläche (Straßenbauamt Düsseldorf)

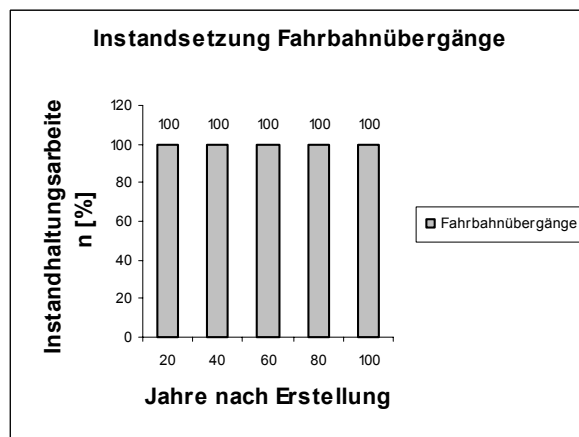


Abbildung 16 Instandsetzung Fahrbahnübergänge

#### (4) Rückbau

Die Kosten für den Rückbau sind im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt worden.

### 6.3.2 Ökologie

Im Rahmen einer ökologischen Betrachtung werden die zur Herstellung und dem Unterhalt benötigten Rohstoffe, der Energiebedarf sowie die bei der Herstellung aufkommenden Emissionen betrachtet. Neben dem Brückengewicht wird das „ökologische Gewicht“ der Konstruktion bewertet. Hierbei werden alle anfallenden Massen mit Hilfe des ökologischen Rucksacks aufaddiert. Auf diesem Wege lassen sich tatsächliche Angaben über die Umweltfreundlichkeit einer Konstruktion treffen.

Die zur Bewertung benötigten Massen lassen sich aus der Kalkulation [9] und den Ausführungen des Wuppertal – Instituts [32] ermitteln.

#### **MIPS – Werte (WI – Institut)**

Unter MIPS – Werten wird der Material-Input pro Serviceeinheit von Produkten verstanden. Somit ist es möglich, zu bestimmen welche Menge an Ressourcen pro Produkt tatsächlich einzusetzen sind. Auf diesem Wege ist zu erkennen, welches Produkt als ökologisch einzustufen ist.

In den Tabellen des Wuppertal – Instituts ist der Materialaufwand eines Produkts in abiotische und biotische Faktoren sowie in Wasser und Luft aufgeteilt. [siehe Anhang 3]

Neben der Bestimmung der MI – Werte einzelner Produkte kann auch der ökologische Rucksack der Baustoffe ermittelt werden. Hierzu werden zum Eigengewicht alle Materialaufwände über die Lebensdauer hinzugerechnet.

Die Bestimmung der MI – Werte ist sehr aufwendig, da alle Prozesse und Vorgänge zur Herstellung, Instandhaltung und dem Rückbau eines Produktes betrachtet werden müssen. Hierzu liegen jedoch fertige Tabellen beim WI – Institut vor [32].

In der vorliegenden Arbeit wird als Serviceeinheit „1 Brückenträger“ verstanden.

### **(1) Ressourcen / Energie / Emissionen**

Die Ökologie wird nach dem Kriterienkatalog von Eisert [5] in die Nebenkriterien Ressourcen, Energie und Emissionen unterteilt. Eine getrennte Bewertung der Kriterien Ressourcen(bedarf), Energie (-aufwand) und Emission ist aufgrund des Herstellungsprozesses und somit der Informations- und Datensammlung nur sehr schwer möglich. Aus diesem Grund wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Bewertung der Ökologie weitestgehend geschlossen betrachtet. Zur Bewertung wird der MIPS – Katalog des Wuppertal – Instituts herangezogen. Die Bewertung kann mit Hilfe dieses Katalogs nach abiotischen und biotischen Materialien sowie dem Wasser- und Luftbedarf bei der Herstellung unterteilt werden. Es ist somit ein Vergleich der baustoffspezifischen Einbaumassen und der tatsächlich ökologisch erforderlichen Massen möglich.

## **7 Bewertung der Vergleichsbrücken**

### **7.1 Allgemeines**

Die in Kapitel 5 vorgestellten Verbundbrücken werden mit Hilfe der Effizienzwertmethode und dem dazugehörigen und im Kapitel 4 vorgestellten Kriterienkatalog bewertet. Die zur Bewertung herangezogenen Beiwerte wurden im Kapitel 6 erläutert.

Die Bewertung erfolgt mit dem in Kapitel 3.4 vorgestellten Prozedere – Tool. Hierzu ist eine externe Aufbereitung der Kriterien von Nöten, da im Prozedere – Tool nur speziell aufbereitete Skalenwerte Anwendung finden.

Die externe Bewertung erfolgt einmalig für jedes Bauwerk, da die spätere Variation der Wichtung unabhängig der Einzelkriterien erfolgt. Somit ist eine Manipulation der Werte ausgeschlossen. In den folgenden Abschnitten wird die Aufbereitung der Datenwerte anhand der Verbundbrücken dargestellt.

Die Auswertung der Bewertung und Variation der Wichtungen wird im darauf folgenden Kapitel 8 vorgestellt.

## 7.2 Bewertung des Nutzens

Die einzelnen Kriterien sind mit Hilfe der angegebenen Formeln zu berechnen oder mittels Skalen und Mittelwertbildung zu bewerten, siehe hierzu Abschnitt 4.2.

Anschließend sind die einzelnen Varianten mittels der variablen Bandbreite zu normieren, vgl. Kapitel 3.3. Die normierten Werte sind auf Ganzzahlen zu Runden und dem Prozedere zuzuführen.

### 7.2.1 Tragen

#### (1) Tragfähigkeit

Tabelle 9 Tragreserve

Var.-Nr	Datenquelle	$E_{zul}$ [kNm]	$E_{vorh}$ [kNm]	$K_{Tragreserve}$	Normierung	Bewertung
1	[9] Kap. 7.4.1	4.969,00	2.110,92	0,575	0,620	<b>6</b>
2	[9] Kap. 8.3	2.891,49	2.062,20	0,287	0,410	<b>4</b>
3	[9] A13.3	2.450,31	1.801,38	0,265	0,394	<b>4</b>
4	[9] A14.3	2.571,86	1.942,32	0,245	0,380	<b>4</b>

1,37

$$K_{Tragreserve} = \frac{E_{zul} - E_{vorh}}{E_{zul}}$$

Tabelle 10 Lastfaktor

Var.-Nr.	Datenquelle	Eigenlast $g$ [kN/m]	Nutzlast $q$ [kN/m]	$K_{Lastfaktor}$	Normierung	Bewertung
1	[9] Kap. 7.2.6	32,62	16,88	0,517	0,487	<b>5</b>
2	[9] Kap. 8.2	32,13	16,88	0,525	0,490	<b>5</b>
3	[9] Kap. A13	25,69	16,88	0,657	0,548	<b>5</b>
4	[9] Kap. A14	29,17	16,88	0,579	0,513	<b>5</b>

2,28

$$K_{Lastfaktor} = \frac{q_k}{g}$$

Tabelle 11 Kraftfluss

Var.-Nr.	Datenquelle	Winkel	Last in			K <sub>Kraftfluss</sub>	Normierung	Bewertung
			Beton-deck	Längs-träger	Auf-lager			
1	[9] Kap. 7	$\alpha$ in °	90	90	90	360	0,5	5
		$\sin \beta_{\max}$	-1	-1	-1			
2	[9] Kap. 8	$\alpha$ in °	90	90	90	360	0,5	5
		$\sin \beta_{\max}$	-1	-1	-1			
3	[9] Kap. A13	$\alpha$ in °	90	90	90	360	0,5	5
		$\sin \beta_{\max}$	-1	-1	-1			
4	[9] Kap. A14	$\alpha$ in °	90	90	90	360	0,5	5
		$\sin \beta_{\max}$	-1	-1	-1			

1440

$$K_{\text{Kraftfluss}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (\sin \beta) \times \alpha_i}$$

**(2) Robustheit**

Tabelle 12 Duktilität

Var.-Nr.	Datenquelle	Stegbreite bw	Plattenbreite b	Stützweite l	Bauteilhöhe h	Vorsp.	K <sub>Duktilität</sub>	Norm.	Bewertung
1	[9] Kap. 7	0,30	2,15	18,00	0,85	0	21,32	0,53	5
2	[9] Kap. 8	0,45	2,15	18,00	1,1644	0	15,67	0,45	5
3	[9] Kap. A13	0,45	2,15	18,00	1,0644	0	17,12	0,47	5
4	[9] Kap. A14	0,45	2,15	18,00	1,1144	0	16,36	0,46	5

70,48

$$K_{\text{Duktilität}}^h = \frac{b_w}{b} + \frac{l}{h} + \frac{1}{\lambda}$$

Tabelle 13 Kompaktheit

Var.-Nr.	Datenquelle	W <sub>0</sub> [cm³]	A <sub>0</sub> [cm³]	K <sub>Kompaktheit</sub>	Normierung	Bewertung
1	[9] Kap. 7	5.700,00	270,00	21,11	0,486	5
2	[9] Kap. 8	13.913,07	588,24	23,65	0,514	5
3	[9] Kap. A13	13.913,07	588,24	23,65	0,514	5
4	[9] Kap. A14	13.913,07	588,24	23,65	0,514	5

92,07

$$K_{\text{Kompaktheit}}^{h, \text{gedr.}} = \frac{W_o}{A_o}$$

Tabelle 14 Redundanz

Var.-Nr.	Datenquelle	Auflagerreaktionen	Stäbe	$K_{\text{Redundanz}}$	Bewertung
1	[9] Kap. 7	6	2	0	9
2	[9] Kap. 8	6	2	0	9
3	[9] Kap. A13	6	2	0	9
4	[9] Kap. A14	6	2	0	9

$$K_{\text{Redundanz}}^{\text{SW,e}} = S_A + S_G - 3 * S_S$$

Tabelle 15 Monolithisch

Var. Nr.	Datenquelle	Bauteiloberfläche	Fugenfläche	Ort der Fuge	$x_{\text{Fuge}}$	$K_{\text{Monolithisch}}$	Norm.	Bewertung
1	[9] Kap. 7	81,00	11	hor. außen	0,8	9,38	0,56	6
2	[9] Kap. 8	81,00	16	hor. außen	0,8	6,15	0,44	4
3	[9] Kap. A13	81,00	16	hor. außen	0,8	6,15	0,44	4
4	[9] Kap. A14	81,00	16	hor. außen	0,8	6,15	0,44	4

27,83

$$K_{\text{Monolithisch}} = \frac{\sum_{i=1}^n A_{o,i}}{\sum_{i=1}^n x_{\text{Fuge}} \times A_{F,i}}$$

Tabelle 16 Fehlerunanfälligkeit

Var. Nr.	Datenquelle	Bewehrungsgrad	Herstellverfahren	Stahlsorte	Toleranzspielraum	$K_{\text{Fehlerunanfälligkeit}}$	Norm.	Bewertung
1	[9] Kap. 7	1,00	0,30	1	0,5	0,70	0,46	5
2	[9] Kap. 8	1,00	0,30	1	0,5	0,70	0,46	5
3	[9] Kap. A13	1,00	1,00	1	1	1,00	0,55	5
4	[9] Kap. A14	1,00	0,80	1	0,8	0,90	0,52	5

3,30

$$K_{\text{Fehlerunanfälligkeit}} = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^n x_{F,i}$$

## 7.2.2 Gebrauchen

### (1) Funktionalität

Tabelle 17 Funktionsgerechtheit

Var. Nr.	Daten- quelle	K <sub>Funktionsgerechtheit</sub>	Normierung	Bewertung
1	[9] Kap. 7	9	0,50	5
2	[9] Kap. 8	9	0,50	5
3	[9] Kap. A13	9	0,50	5
4	[9] Kap. A14	9	0,50	5

36

$$K_{\text{Funktionsgerechtheit}} = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^n x_{E,i} = 1$$

Alle zum Vergleich stehenden Brücken wurden als Fußgängerbrücken mit zusätzlicher Nutzung als Wirtschaftsweg geplant. Somit erfüllen alle Brücken die Kriterien der Funktionsgerechtheit.

Tabelle 18 Ausbaufähigkeit

Var.- Nr.	Daten- quelle	K <sub>Ausbaufähigkeit</sub>	Bewertung
1			-
2			-
3			-
4			-

$$K_{\text{Ausbaufähigkeit}}^h = x_{A,1} \cdot x_{A,2} \cdot \frac{1}{1+n}$$

In diesem Kriterium wird vor allem die Aufnahmemöglichkeit des technischen Ausbaus betrachtet, insbesondere der Haustechnik. Da im Rahmen des Vergleichs kein wirklicher technischer Ausbau stattfindet, wird dieses Kriterium nicht betrachtet.

Tabelle 19 Funktionsredundanz

Var.-Nr.	Datenquelle	K <sub>Funktionsredundanz</sub>	Bewertung
1			-
2			-
3			-
4			-

Dieses Kriterium bleibt unberücksichtigt, da die Hauptfunktionen der Brücke bereits in der „Funktionsgerechtheit“ enthalten sind. [Eisert]

## (2) Dauerhaftigkeit

Tabelle 20 Beständigkeit

Var. Nr.	Datenquelle	Rissbreite*	Betondeckung	Betonfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Nachbehandlung	K <sub>Beständigkeit</sub>	Norm.	Bewertung
1	[9] Kap. 7	sehr klein 7	groß 9	45 4	normal 5	6,25	0,48	5
2	[9] Kap. 8	klein 5	groß 9	45 4	normal 5	5,75	0,46	5
3	[9] Kap. A13	keine 9	groß 9	45 4	sehr gut 9	7,75	0,54	5
4	[9] Kap. A14	sehr klein 7	groß 9	45 4	sehr gut 9	7,25	0,52	5

27,00

$$K_{\text{Beständigkeit}} = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^n x_{F,i}$$

\* - Betondeck befindet sich nicht in Zugzone, daher keine Risse im Betondeck infolge Biegung. Risse sind infolge Kriechen und Schwinden, sowie Temperatur möglich und somit zu bewerten.

Tabelle 21 *Wartung*

Var.-Nr.	Datenquelle	Zugänglichkeit <sup>1</sup>	Sichtbarkeit	K <sub>Wartung</sub>	Norm.	Bewertung
1	[9] Kap. 7	keine Verkleidung	normal			
		9	5	7,00	0,5	<b>5</b>
2	[9] Kap. 8	keine Verkleidung	normal			
		9	5	7,00	0,5	<b>5</b>
3	[9] Kap. A13	keine Verkleidung	normal			
		9	5	7,00	0,5	<b>5</b>
4	[9] Kap. A14	keine Verkleidung	normal			
		9	5	7,00	0,5	<b>5</b>
28,00						

$$K_{\text{Wartung}} = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^n x_{F,i}$$

<sup>1</sup> – Bewertung der optischen Zugänglichkeit (Sichtbarkeit der tragenden Konstruktion)

Tabelle 22 *Instandhaltung*

Var. Nr.	Datenquelle	Zugänglichkeit <sup>2</sup>	Störung Betrieb	Zahl der Verfahren*	Oberflächenfestigkeit	Bew.	K <sub>Instandhaltung</sub>	Norm.	Bewertung
1	[9] Kap. 7	gut	lokal	sehr viele	sehr gut	Stb.			
		7	5	1	9	9	6,20	0,48	<b>5</b>
2	[9] Kap. 8	gut	lokal	viele	sehr gut	Stb.			
		7	5	3	9	9	6,60	0,49	<b>5</b>
3	[9] Kap. A13	gut	lokal	wenige	sehr gut	Stb.			
		7	5	7	9	9	7,40	0,52	<b>5</b>
4	[9] Kap. A14	gut	lokal	mittel	sehr gut	Stb.			
		7	5	5	9	9	7,00	0,51	<b>5</b>
27,20									

$$K_{\text{Instandhaltung}} = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^n x_{F,i}$$

<sup>2</sup> – Bewertung der räumlichen Zugänglichkeit (Leiterwagen, Spezialgerät, usw.)

\* -Zur Instandhaltung benötigte Arbeitsverfahren. Viele anzuwendende Verfahren sind als kompliziert und somit als schlechter zu bewerten.

**(3) Verformung**

Tabelle 23 Biegeverformung

Var.-Nr.	Datenquelle	zul f [cm]	vorh. f [cm]	$K_{\text{Biegeverformung}}$	Norm.	Bewertung
1	[9] Kap. 7.7.5	9	4,39	0,51	0,784	<b>8</b>
2	[9] Kap. 8	9	5,50	0,39	0,647	<b>6</b>
3	[9] Kap. A13	9	9,50	0,00	0,000	<b>0</b>
4	[9] Kap. A14	9	9,50	0,00	0,000	<b>0</b>

0,90

$$K_{\text{Biegeverformung}} = \frac{f_{\text{zul}} - f_{\text{vorh}}}{f_{\text{zuk}}}$$

Tabelle 24 Schubverformung; Tragfähigkeit der Verbundfuge

Var. Nr.	Datenquelle	$V_{\text{sd}}$ [kN/m]	$V_{\text{rd},1}$ [kN/m]	$N_{\text{pla,Sd}}$ [kN]	$\Sigma P_{\text{RD}}$ [kN]	$\cdot \text{RD} / \cdot \text{SD}$	$K_{\text{Schubverformung}}$	Norm.	Bewertung
1	[9] Kap. 7.5			10.645	12.160	0,88			
	[9] Kap. 7.6	675	684			0,99	0,93	0,57	<b>6</b>
2	[9] Kap. 8.4			4.411	4.864	0,91			
		552	560			0,99	0,95	0,57	<b>6</b>
3	[9] A13.4			4.441	70.774	0,06			
		675	675			1,00	0,53	0,43	<b>4</b>
4	[9] A14.4			4.441	70.774	0,06			
		675	690			0,98	0,52	0,43	<b>4</b>

2,93

$$K_{\text{Schubverformung}} = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^n x_{F,i}$$

Tabelle 25 Längsverformung

Var.-Nr.	Datenquelle	$K_{\text{Längsverformung}}$	Norm.	Bewertung
1	[9] Kap. 7	9	0,583	6
2	[9] Kap. 8	5	0,417	4
3	[9] Kap. A13	5	0,417	4
4	[9] Kap. A14	5	0,417	4

24

$$K_{\text{Längsverformung}} = \frac{l}{l + |\Delta l_L \pm \Delta l_T|}$$

Aufgrund der unterschiedlichen Temperatúrausdehnungskoeffizienten ist die Längsverformung zu bewerten.

Stahl Temperatúrausdehnungskoeffizient

$$\alpha = 10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

GFK Temperatúrausdehnungskoeffizient

$$\alpha = 20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

Beton Temperatúrausdehnungskoeffizient

$$\alpha = 10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

### 7.2.3 Erleben

#### (1) Optik

Tabelle 26 Ablesbarkeit

Var. Nr.	Daten quelle	Form	Farbe	Textur	Prop.	Struktur	Mat.	K <sub>Ables- barkeit</sub>	Norm.	Bewertung
1	[9] Kap. 7	entspr.	entspr.	ang.	ang.	ang.	ang.			
		7	9	5	5	5	5	6	0,5	5
2	[9] Kap. 8	entspr.	entspr.	ang.	ang.	ang.	ang.			
		7	9	5	5	5	5	6	0,5	5
3	[9] Kap. A13	entspr.	entspr.	ang.	ang.	ang.	ang.			
		7	9	5	5	5	5	6	0,5	5
4	[9] Kap. A14	entspr.	entspr.	ang.	ang.	ang.	ang.			
		7	9	5	5	5	5	6	0,5	5

24

$$K_{\text{Ablesbarkeit}} = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^n x_{F,i}$$

entspr. - entsprechend  
ang. - angemessen

Tabelle 27 Lichtführung

Var. Nr.	Daten quelle	Träger- höhe [m]	Erscheinung			K <sub>Licht- führung</sub>	Norm.	Bewertung
			Träger- breite [m]	Höhe / Breite	Untersicht			
1	[9] Kap. 7	0,60	0,30		Stahl + Beton			
		5	9	7	5	6	0,50	5
2	[9] Kap. 8	0,91	0,46		GFK + Beton			
		3	7	5	5	5	0,46	5
3	[9] Kap. A13	0,91	0,46		GFK + GFK - Planke			
		3	7	5	9	7	0,54	5
4	[9] Kap. A14	0,91	0,46		GFK + Sicht- beton			
		3	7	5	7	6	0,50	5

24

$$K_{\text{Lichtführung}} = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^n x_{F,i}$$

Tabelle 28 Umgebungsbezug

Var. Nr.	Daten quelle	K <sub>Umgebungsbezug</sub>	Norm.	Bewertung
1				
2				
3				
4				

$$K_{\text{Umgebungsbezug}} = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^n x_{F,i}$$

Die Bewertung des Umgebungsbezugs wird im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt.

## (2) Haptik

Tabelle 29 Sicherheitsempfinden

Var. Nr.	Daten quelle	Opt. Stabilität	K <sub>Sicherheitsempfinden</sub>	Normierung	Bewertung
1	[9] Kap. 7	hoch			
		7	7,00	0,469	5
2	[9] Kap. 8	sehr hoch			
		9	9,00	0,531	5
3	[9] Kap. A13	sehr hoch			
		9	9,00	0,531	5
4	[9] Kap. A14	hoch			
		7	7,00	0,469	5

32,00

$$K_{\text{Sicherheitsempfinden}} = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^n x_{F,i}$$

Tabelle 30 Schwingung

Var. Nr.	Daten quelle	f <sub>erf</sub> [Hz]	f <sub>vorh</sub> [Hz]	K <sub>Schwingung</sub>	Norm.	Bewertung
1	[9] Kap. 7	3	4,05	0,74	0,475	5
2	[9] Kap. 8	3	3,60	0,83	0,503	5
3	[9] Kap. A13	3	3,30	0,91	0,525	5
4	[9] Kap. A14	3	3,60	0,83	0,503	5

3,32

$$K_{\text{Schwingung}} = \frac{f_{\text{erf}}}{f_{\text{zul}}}$$

## **Raumklima**

Dieses Kriterium wird ausschließlich bei raumbildenden Bauwerken angewandt.

### **(3) Akustik**

#### **Raumakustik**

Die Raumakustik wird im Rahmen der Brückenbewertung außer Acht gelassen.

#### **Luftschall**

Hierbei wird der Übergang des Luftschalls von einer Seite des Tragwerks zur anderen bewertet. Somit kann man die Auswirkung des entstehenden Schalls durch den Straßenverkehr bewerten.

#### **Körperschall**

Hier kann der Widerstand des Tragwerks gegenüber dem Körperschall bewertet werden.

## 7.3 Bewertung des Aufwands

### 7.3.1 Ökonomie

#### (1) Herstellungskosten

##### Brückenvariante Nr.1 (Stahl/Beton – Verbundbrücke)

Pos.	Menge	Beschreibung	Einheit	Preis	Summe
<b>1</b>		<b>Herstellungs- und Einbaukosten</b>			
<b>1.1</b>		<b>Beton</b>			
<b>1.1.1</b>		<b>Beton der Klasse C35/45 herstellen</b>	m <sup>3</sup>		
	19,35	Herstellung, Transport, Einbau, 25cm stark, inkl. Bewehrungsstahl		113,00	<b>2.186,55</b>
<b>1.2</b>		<b>Baustahl</b>			
<b>1.2.1</b>		<b>Walzprofilstahl S355 herstellen, liefern, einbauen</b>	t		
	10,26	Herstellung, Einbau, Transport		3500,00	<b>35.910,00</b>
<b>2</b>		<b>Schalungskosten</b>			
<b>2.1</b>		<b>Schalung Beton</b>	m <sup>2</sup>		
	19,35	Schalung errichten, vorhalten und entfernen.		140,00	<b>2.709,00</b>
<b>2.2</b>		<b>Schalung vorhalten</b>	d		
		Kosten der Schalung pro Tag			
<b>3</b>		<b>Brückenausrüstung</b>			
<b>3.1</b>		<b>Verformungslager</b>	Stück		
	4,00	Verformungslager Transport, Einbau		808,03	<b>3.232,12</b>
<b>3.1.1</b>		<b>Fahrbahnübergangskonstruktion</b>	m		
	10,00	Fahrbahnübergangskonstruktion		705,87	<b>7.058,70</b>
<b>3.1.2</b>		<b>Geländer</b>	m		
	36,00	Geländer herstellen, Transport, Einbau		114,82	<b>4.133,52</b>
<b>3.1.3</b>		<b>Kappen</b>			
	7,83	incl. Schalung	m <sup>3</sup>	301,27	<b>2.358,94</b>
<b>3.1.4</b>	2,00	<b>Brückenablauf</b>	Stück	540,09	<b>1.080,18</b>
<b>3.1.5</b>	18,00	<b>Abflussleitung</b>	m	93,90	<b>1.690,20</b>
<b>4</b>		<b>Brückenbelagsarbeiten</b>			
<b>4.1</b>		<b>Fahrbahnbelag</b>	m <sup>2</sup>		
	90,00	8 cm Fahrbahnbelag einbringen, Transport		19,57	<b>1.761,30</b>
<b>4.2</b>		<b>Oberfläche versiegeln</b>	m <sup>2</sup>		
	90,00	Oberfläche Druckluftstrahlen		2,19	<b>197,10</b>
<b>4.3</b>	90,00	Oberfläche Epoxydharzversiegelung		9,90	<b>891,00</b>
<b>4.4</b>	90,00	Schweißbahnaufbringung		30,28	<b>2.725,20</b>
<b>4.5</b>		<b>Schrammbord</b>	m <sup>3</sup>		
	7,83	Schrammbord einbringen		301,27	<b>2.358,94</b>

**Summe 68.292,76**

**Brückenvariante Nr.2 (GFK/Beton – Verbundbrücke)**

Pos.	Menge	Beschreibung	je Einheit	Preis	Summe
<b>1</b>		<b>Herstellungs- und Einbaukosten</b>			
<b>1.1</b>		<b>Beton</b>			
<b>1.1.1</b>		<b>Beton der Klasse C35/45 herstellen</b>	m <sup>3</sup>		
	19,35	Herstellung, Transport, Einbau, 25cm stark, inkl. Bewehrungsstahl		113,00	<b>2.186,55</b>
<b>1.2</b>		<b>GFK - Längsträgerprofile</b>			
<b>1.2.1</b>		<b>GFK - Profile herstellen</b>	t		
	3,82	Herstellung 2x18m Strongwell Extren DWB		7.967,36	<b>30.403,45</b>
<b>1.2.2</b>		<b>GFK - Profil Einbau</b>	t		
	3,82	Einbau der GFK – Profile, Transport		1.000,00	<b>3.820,00</b>
<b>2</b>		<b>Schalungskosten</b>			
<b>2.1</b>		<b>Schalung Beton</b>	m <sup>2</sup>		
	19,35	Schalung errichten, vorhalten und entfernen		140,00	<b>2.709,00</b>
<b>2.2</b>		<b>Schalung vorhalten</b>	Tage		
		Kosten der Schalung pro Tag			
<b>3</b>		<b>Brückenausrüstung</b>			
<b>3.1</b>		<b>Verformungslager</b>	Stück		
	4,00	Verformungslager anliefern und einbauen		808,03	<b>3.232,12</b>
<b>3.1.1</b>		<b>Fahrbahnübergangskonstruktion</b>	lfd. m		
	10,00	Fahrbahnübergangskonstruktion anliefern und einbauen		705,87	<b>7.058,70</b>
<b>3.1.2</b>		<b>Geländer</b>	lfd. m		
	36,00	Geländer herstellen, Transport, Einbau		114,82	<b>4.133,52</b>
<b>3.1.3</b>		<b>Kappen</b>			
	7,83	incl. Schalung	m <sup>3</sup>	301,27	<b>2.358,94</b>
<b>3.1.4</b>		<b>Brückenablauf</b>	Stück		
	2,00			540,09	<b>1.080,18</b>
<b>3.1.5</b>		<b>Abflussleitung</b>			
	18,00		m	93,90	<b>1.690,20</b>
<b>4</b>		<b>Brückenbelagsarbeiten</b>			
<b>4.1</b>		<b>Fahrbahnbelag</b>	m <sup>2</sup>		
	90,00	8 cm Fahrbahnbelag einbringen, incl. Transport auf Baustelle		19,57	<b>1.761,30</b>
<b>4.2</b>		<b>Oberfläche versiegeln</b>	m <sup>2</sup>		
	90,00	Oberfläche Druckluftstrahlen		2,19	<b>197,10</b>
<b>4.3</b>	90,00	Oberfläche Epoxydharzversiegelung		9,90	<b>891,00</b>
<b>4.4</b>	90,00	Schweißbahnaufbringung		30,28	<b>2.725,20</b>
<b>4.5</b>		<b>Schrammbord</b>	m <sup>3</sup>		
	7,83	Schrammbord einbringen		301,27	<b>2.358,94</b>

---

**Summe 66.606,20**

**Brückenvariante Nr.3 (GFK/Beton + SAFPLANK – Profil)**

Pos.	Menge	Beschreibung	je Einheit	Preis	Summe
<b>1</b>		<b>Herstellungs- und Einbaukosten</b>			
<b>1.1</b>		<b>Beton</b>			
<b>1.1.1</b>		<b>Beton der Klasse C35/45 herstellen</b>	m <sup>3</sup>		
	11,61	Herstellung, Transport, Einbau, 15 cm stark, inkl. Bewehrungsstahl		113,00	<b>1.311,93</b>
<b>1.2</b>		<b>GFK - Längsträgerprofile</b>			
<b>1.2.1</b>		<b>GFK - Profile herstellen</b>	t		
	3,82	Herstellung 2x18m Strongwell Extren DWB		7.967,36	<b>30.403,45</b>
<b>1.2.2</b>		<b>GFK - Profil Einbau</b>	t		
	3,82	Einbau der GFK - Profile, Transport		1.000,00	<b>3.820,00</b>
<b>1.3</b>		<b>GFK - SAFPLANK Profile</b>			
<b>1.3.1</b>		<b>SAFPLANK - Profile herstellen</b>	m <sup>2</sup>		
	77,40	Profil herstellen		53,00	<b>4.102,20</b>
<b>1.3.2</b>		<b>SAFPLANK - Profile Einbau</b>	m <sup>2</sup>		
	77,40	Profil einbauen, incl. Transport auf Baustelle		50,00	<b>3.870,00</b>
<b>2</b>		<b>Brückenausrüstung</b>			
<b>2.1</b>		<b>Verformungslager</b>	Stück		
	4,00	Verformungslager anliefern und einbauen		808,03	<b>3.232,12</b>
<b>2.1.1</b>		<b>Fahrbahnübergangskonstruktion</b>	lfd. m		
	10,00	Fahrbahnübergangskonstruktion		705,87	<b>7.058,70</b>
<b>2.1.2</b>		<b>Geländer</b>	lfd. m		
	36,00	Geländer herstellen, Transport, Einbau		114,82	<b>4.133,52</b>
<b>2.1.3</b>		<b>Kappen</b>			
	7,83	incl. Schalung	m <sup>3</sup>	301,27	<b>2.358,94</b>
<b>2.1.4</b>		<b>Brückenablauf</b>	Stück		
	2,00			540,09	<b>1.080,18</b>
<b>2.1.5</b>		<b>Abflussleitung</b>			
	18,00		m	93,90	<b>1.690,20</b>
<b>3</b>		<b>Brückenbelagsarbeiten</b>			
<b>3.1</b>		<b>Fahrbahnbelag</b>	m <sup>2</sup>		
	90,00	8 cm Fahrbahnbelag einbringen, Transport		19,57	<b>1.761,30</b>
<b>3.2</b>		<b>Oberfläche versiegeln</b>	m <sup>2</sup>		
	90,00	Oberfläche Druckluftstrahlen		2,19	<b>197,10</b>
<b>3.3</b>	90,00	Oberfläche Epoxydharzversiegelung		9,90	<b>891,00</b>
<b>3.4</b>	90,00	Schweißbahnaufbringung		30,28	<b>2.725,20</b>
<b>3.5</b>		<b>Schrammbord</b>	m <sup>3</sup>		
	7,83	Schrammbord einbringen		301,27	<b>2.358,94</b>
<b>4</b>		<b>Verbundfuge</b>			
<b>4.1</b>		<b>Klebefuge</b>			
		Klebefuge herstellen		1.350,00	<b>1.350,00</b>

**Summe 72.344,78**

**Brückenvariante Nr.4 (GFK/Beton + Filigranplatte)**

Pos.	Menge	Beschreibung	je Ein- heit	Preis	Summe
<b>1</b>		<b>Herstellungs- und Einbaukosten</b>			
<b>1.1</b>		<b>Beton</b>			
<b>1.1.1</b>		<b>Beton der Klasse C35/45 herstellen</b>	m <sup>3</sup>		
	15,48	Herstellung, Transport, Einbau, 20 cm stark, inkl. Bewehrungsstahl		113,00	<b>1.749,24</b>
<b>1.2</b>		<b>GFK - Längsträgerprofile</b>			
<b>1.2.1</b>		<b>GFK - Profile herstellen</b>	t		
	3,82	Herstellung 2x18m Strongwell Extren DWB		7.967,36	<b>30.403,45</b>
<b>1.2.2</b>		<b>GFK - Profil Einbau</b>	t		
	3,82	Einbau der GFK - Profile, Transport		1.000,00	<b>3.820,00</b>
<b>2</b>		<b>Brückenausrüstung</b>			
<b>2.1</b>		<b>Verformungslager</b>	Stück		
	4,00	Verformungslager anliefern und einbauen		808,03	<b>3.232,12</b>
<b>2.1.1</b>		<b>Fahrbahnübergangskonstruktion</b>	lfd. m		
	10,00	Fahrbahnübergangskonstruktion		705,87	<b>7.058,70</b>
<b>2.1.2</b>		<b>Geländer</b>	lfd. m		
	36,00	Geländer herstellen, Transport, Einbau		114,82	<b>4.133,52</b>
<b>2.1.3</b>		<b>Kappen</b>			
	7,83	incl. Schalung	m <sup>3</sup>	301,27	<b>2.358,94</b>
<b>2.1.4</b>		<b>Brückenablauf</b>	Stück		
	2,00			540,09	<b>1.080,18</b>
<b>2.1.5</b>		<b>Abflussleitung</b>			
	18,00		m	93,90	<b>1.690,20</b>
<b>3</b>		<b>Brückenbelagsarbeiten</b>			
<b>3.1</b>		<b>Fahrbahnbelag</b>	m <sup>2</sup>		
	90,00	8 cm Fahrbahnbelag einbringen, Transport		19,57	<b>1.761,30</b>
<b>3.2</b>		<b>Oberfläche versiegeln</b>	m <sup>2</sup>		
	90,00	Oberfläche Druckluftstrahlen		2,19	<b>197,10</b>
<b>3.3</b>	90,00	Oberfläche Epoxydharzversiegelung		9,90	<b>891,00</b>
<b>3.4</b>	90,00	Schweißbahnaufbringung		30,28	<b>2.725,20</b>
<b>3.5</b>		<b>Schrammbord</b>	m <sup>3</sup>		
	7,83	Schrammbord einbringen		301,27	<b>2.358,94</b>
<b>4</b>		<b>Verbundfuge</b>			
<b>4.1</b>		<b>Klebefuge</b>			
		Klebefuge herstellen		1.350,00	<b>1.350,00</b>

**Summe 64.809,89**

Tabelle 31 Überblick Herstellungskosten der Brückenvarianten [€]

Variante	Gesamtkosten ohne Zuschläge	20% Zuschlag (nicht erfasste Leistungen)	8% Zuschlag (BE und Montage)	Gesamtkosten €
1	68.292,76	13.658,55	5.463,42	<b>87.414,73</b>
2	66.606,20	13.321,24	5.328,50	<b>85.255,94</b>
3	72.344,78	14.468,96	5.787,58	<b>92.601,32</b>
4	64.809,89	12.961,98	5.184,79	<b>82.956,66</b>

## (2) Planungskosten

Tabelle 32 Planungskosten für die Grundlagenermittlung bis zur Ausführung [€]

Variante	1	2	3	4
<b>Anrechenbare Kosten</b>	87.414,73	85.255,94	92.601,32	82.956,66
<b>Honorarzone</b>	II	II	II	II
<b>Objektplanung</b>				
Mindestsatz	10.141,90	9.949,60	10.603,93	9.744,78
Grundlagenermittlung	2% 202,84	2% 198,99	2% 212,08	2% 194,90
Vorplanung	15% 1.521,29	15% 1.492,44	15% 1.590,59	15% 1.461,72
Entwurfsplanung	30% 3.042,57	30% 2.984,88	30% 3.181,18	30% 2.923,43
Genehmigungsplanung	5% 507,10	5% 497,48	5% 530,20	5% 487,24
Ausführungsplanung	15% 1.521,29	15% 1.492,44	15% 1.590,59	15% 1.461,72
<b>Gesamthonorar</b>	<b>6.795,07</b>	<b>6.666,23</b>	<b>7.104,63</b>	<b>6.529,00</b>
<b>Tragwerksplanung</b>				
Mindestsatz	6.949,71	6.602,20	7.061,43	6.458,45
Grundlagenermittlung	3% 208,49	3% 198,07	3% 211,84	3% 193,75
Vorplanung	10% 694,97	10% 660,22	10% 706,14	10% 645,85
Entwurfsplanung	12% 833,97	12% 792,26	12% 847,37	12% 775,01
Genehmigungsplanung	30% 2.084,91	30% 1.980,66	30% 2.118,43	30% 1.937,54
Ausführungsplanung	42% 2.918,88	42% 2.772,92	42% 2.965,80	42% 2.712,55
<b>Gesamthonorar</b>	<b>6.741,22</b>	<b>6.404,13</b>	<b>6.849,59</b>	<b>6.264,70</b>
<b>Honorar (netto) einschl. 8%</b>				
<b>Nebenkosten</b>	<b>14.619,19</b>	<b>14.115,99</b>	<b>15.070,56</b>	<b>13.817,19</b>

Tabelle 33 Planungskosten für Vorbereitung Vergabe bis zur Objektbetreuung [€]

Variante	1	2	3	4
<b>Anrechenbare Kosten</b>	87.414,73	85.255,94	92.601,32	82.956,66
<b>Honorarzone</b>	II	II	II	II
<b>Objektplanung</b>				
Mindestsatz	10.141,90	9.949,60	10.603,93	9.744,78
Bewertung d. Grundleistung	33%	33%	33%	33%
Honorar	3.346,83	3.283,37	3.499,30	3.215,78
<b>Tragwerksplanung</b>				
Mindestsatz	6.949,71	6.602,20	7.061,43	6.458,45
Bewertung d. Grundleistung	3%	3%	3%	3%
Honorar	208,49	198,07	211,84	193,75
<b>Honorar (netto) einschl. 8%</b>				
<b>Nebenkosten</b>	<b>3.839,74</b>	<b>3.759,95</b>	<b>4.008,03</b>	<b>3.682,29</b>

Tabelle 34 Gesamtplanungskoten [€]

Gesamtplanungskosten	1	2	3	4
Grundlagenermittlung bis Ausführung	14.619,19	14.115,99	15.070,56	13.817,19
Vorbereitung Vergabe bis Objektbetreuung	3.839,74	3.759,95	4.008,03	3.682,29
<b>Summe</b>	<b>18.458,94</b>	<b>17.875,94</b>	<b>19.078,59</b>	<b>17.499,49</b>

### **(3) Instandhaltungs- und Betriebskosten**

Im Rahmen der Betrachtung der Instandhaltungskosten werden die Lebenszykluskosten betrachtet. Es wird ein Bestandszeitraum von 100 Jahren betrachtet. Die Betrachtung eines 100-jährigen Zeitraumes entspricht einer durchschnittlichen Brückenstanddauer, siehe Kapitel 6.3.1.

Alle zu bewertenden Brücken haben die gleiche Brückenfläche. Somit unterscheiden sich die Instandhaltungs- und Betriebskosten nur in den durchzuführenden Arbeiten. Bei Brückenvariante 1 sind alle in Kapitel 6.3 aufgeführten Maßnahmen durchzuführen. Bei den Vergleichsbrückenkonstruktionen 2 – 4 sind aufgrund der unterschiedlichen eingesetzten Materialien nur die den Bedürfnissen entsprechende Schritte auszuführen. Aus diesem Grund werden in den nachfolgenden Abschnitten die Kosten für Variante 1 ermittelt. In einer nachfolgenden Gegenüberstellung werden anhand der zuvor berechneten Instandhaltungsmaßnahmen die Kosten der Varianten 2 – 4 zusammengestellt und mit Variante 1 tabellarisch sowie im Diagramm verglichen.

**Lebenszykluskosten Variante 1:**

Tabelle 35 Korrosionsschutz

Pos.	Menge	Beschreibung	Einheit	Preis	Summe
			Rep.-Fläche		
<b>1</b>		<b>Korrosionsschutz</b>			
<b>1.1</b>	90,00	<b>nach 15 Jahren</b> 7% der Beschichtungsfläche ausflecken	m <sup>2</sup> 6,30	20,45	<b>128,84</b>
<b>1.2</b>	90,00	<b>nach 25 Jahren</b> 10% der Beschichtungsfläche ausflecken plus komplett neue Deckbeschichtung	m <sup>2</sup> 9,00	32,72	<b>294,48</b>
<b>1.3</b>	90,00	<b>nach 45 Jahren</b> komplettes Korrosionsschutzsystem erneuern	m <sup>2</sup> 90,00	86,91	<b>7.822,13</b>
<b>1.4</b>	90,00	<b>nach 60 Jahren</b> 7% der Beschichtungsfläche ausflecken	m <sup>2</sup> 6,30	20,45	<b>128,84</b>
<b>1.5</b>	90,00	<b>nach 70 Jahren</b> 10% der Beschichtungsfläche ausflecken plus komplett neue Deckbeschichtung	m <sup>2</sup> 9,00	32,72	<b>294,48</b>
<b>1.6</b>	90,00	<b>nach 90 Jahren &gt; 100 Jahre</b> komplettes Korrosionsschutzsystem erneuern	m <sup>2</sup> 90,00	86,91	<b>7.822,13</b>
<b>1.7</b>	90,00	<b>nach 105 Jahren</b> 7% der Beschichtungsfläche ausflecken	m <sup>2</sup> 6,30	20,45	<b>128,84</b>

**Summe 16.619,72**

Tabelle 36 *Instandsetzung und Erneuerung der Beläge*

Pos.	Menge	Beschreibung	Einheit	Preis	Summe
			Rep.-Fläche		
<b>2</b>		<b>Instandsetzung und Erneuerung der Beläge</b>			
<b>2.1</b>	90,00	<b>nach 10 Jahren</b> 12% der Deck- und Schutzschicht 5% der Dichtungsschicht	m <sup>2</sup> 15,30	8,69	<b>132,96</b>
<b>2.2</b>	90,00	<b>nach 15 Jahren</b> 50% der Deck- und Schutzschicht 12% der Dichtungsschicht	m <sup>2</sup> 55,80	24,33	<b>1.357,73</b>
<b>2.3</b>	90,00	<b>nach 25 Jahren</b> gesamtes Deck- und Schutzschicht 50% der Dichtungsschicht	m <sup>2</sup> 135,00	52,14	<b>7.038,90</b>
<b>2.4</b>	90,00	<b>nach 35 Jahren</b> 12% der Deck- und Schutzschicht 5% der Dichtungsschicht	m <sup>2</sup> 15,30	8,69	<b>132,96</b>
<b>2.5</b>	90,00	<b>nach 40 Jahren</b> 50% der Deck- und Schutzschicht 12% der Dichtungsschicht	m <sup>2</sup> 55,80	24,33	<b>1.357,73</b>
<b>2.6</b>	90,00	<b>nach 50 Jahren</b> gesamtes Deck- und Schutzschicht 50% der Dichtungsschicht	m <sup>2</sup> 135,00	52,14	<b>7.038,90</b>
<b>2.7</b>	90,00	<b>nach 60 Jahren</b> 12% der Deck- und Schutzschicht 5% der Dichtungsschicht	m <sup>2</sup> 15,30	8,69	<b>132,96</b>
<b>2.8</b>	90,00	<b>nach 65 Jahren</b> 50% der Deck- und Schutzschicht 12% der Dichtungsschicht	m <sup>2</sup> 55,80	24,33	<b>1.357,73</b>
<b>2.9</b>	90,00	<b>nach 75 Jahren</b> gesamtes Deck- und Schutzschicht 50% der Dichtungsschicht	m <sup>2</sup> 135,00	52,14	<b>7.038,90</b>
<b>2.10</b>	90,00	<b>nach 85 Jahren</b> 12% der Deck- und Schutzschicht 5% der Dichtungsschicht	m <sup>2</sup> 15,30	8,69	<b>132,96</b>
<b>2.11</b>	90,00	<b>nach 90 Jahren</b> 50% der Deck- und Schutzschicht 12% der Dichtungsschicht	m <sup>2</sup> 55,80	24,33	<b>1.357,73</b>
<b>2.12</b>	90,00	<b>nach 100 Jahren</b> gesamtes Deck- und Schutzschicht 50% der Dichtungsschicht	m <sup>2</sup> 135,00	52,14	<b>7.038,90</b>

**Summe 34.118,33**

Tabelle 37 *Instandsetzung der Betonflächen*

Pos.	Menge	Beschreibung	Einheit	Preis	Summe
			Rep.-Fläche		
<b>3</b>		<b>Instandsetzung der Betonoberflächen</b>			
<b>3.1</b>	90,00	<b>nach 20 Jahren</b> 3% der Betonflächen ausbessern 10% durch eine Beschichtung schützen	m <sup>2</sup> 11,70	15,34	<b>179,48</b>
<b>3.2</b>	90,00	<b>nach 35 Jahren</b> Ausbesserungsanteil 11% Beschichtungsanteil 15%	m <sup>2</sup> 23,40	30,68	<b>717,91</b>
<b>3.3</b>	90,00	<b>nach 60 Jahren</b> Ausbesserungsanteil 18% Beschichtungsanteil 25%	m <sup>2</sup> 38,70	39,88	<b>1.543,51</b>
<b>3.4</b>	90,00	<b>nach 80 Jahren</b> 3% der Betonflächen ausbessern 10% durch eine Beschichtung schützen	m <sup>2</sup> 11,70	15,34	<b>179,48</b>
<b>3.5</b>	90,00	<b>nach 95 Jahren</b> Ausbesserungsanteil 11% Beschichtungsanteil 15%	m <sup>2</sup> 23,40	30,68	<b>717,91</b>
<b>3.6</b>	90,00	<b>nach 115 Jahren</b> Ausbesserungsanteil 18% Beschichtungsanteil 25%	m <sup>2</sup> 38,70	39,88	<b>1.543,51</b>

**Summe 4.881,80**Tabelle 38 *Instandsetzung und Erneuerung der Fahrbahnübergänge*

Pos.	Menge	Beschreibung	Einheit	Preis	Summe
			Rep.-Fläche		
<b>4</b>		<b>Instandsetzung und Erneuerung der Fahrbahnübergänge</b>			
<b>4.1</b>	90,00	<b>nach 20 Jahren</b> Kompletttausch	m <sup>2</sup> 90,00	12,78	<b>1.150,20</b>
<b>4.2</b>	90,00	<b>nach 40 Jahren</b> Kompletttausch	m <sup>2</sup> 90,00	12,78	<b>1.150,20</b>
<b>4.3</b>	90,00	<b>nach 60 Jahren</b> Kompletttausch	m <sup>2</sup> 90,00	12,78	<b>1.150,20</b>
<b>4.4</b>	90,00	<b>nach 80 Jahren</b> Kompletttausch	m <sup>2</sup> 90,00	12,78	<b>1.150,20</b>
<b>4.5</b>	90,00	<b>nach 100 Jahren</b> Kompletttausch	m <sup>2</sup> 90,00	12,78	<b>1.150,20</b>

**Summe 5.751,00**

### Variante 1 – Zusammenstellung der Instandhaltungskosten

Korrosionsschutz	16.619,72
Instandsetzung und Erneuerung der Beläge	34.118,33
Instandsetzung der Betonoberflächen	4.881,80
Instandsetzung und Erneuerung der Fahrbahnübergänge	5.751,00
<b>Summe</b>	<b>61.370,85</b>

### Gegenüberstellung der Instandhaltungskosten der einzelnen Brückenvarianten

Tabelle 39 Instandhaltungs- und Betriebskosten

Brückenvariante	1	2	3	4
Korrosionsschutz	16.619,72	-	-	-
Instandsetzung und Erneuerung der Beläge	34.118,33	34.118,33	34.118,33	34.118,33
Instandsetzung der Betonoberflächen	4.881,80	4.881,80	-	4.881,80
Instandsetzung und Erneuerung der Fahrbahnübergänge	5.751,00	5.751,00	5.751,00	5.751,00
<b>Gesamtkosten [€]</b>	<b>61.370,85</b>	<b>44.751,13</b>	<b>39.869,33</b>	<b>44.751,13</b>

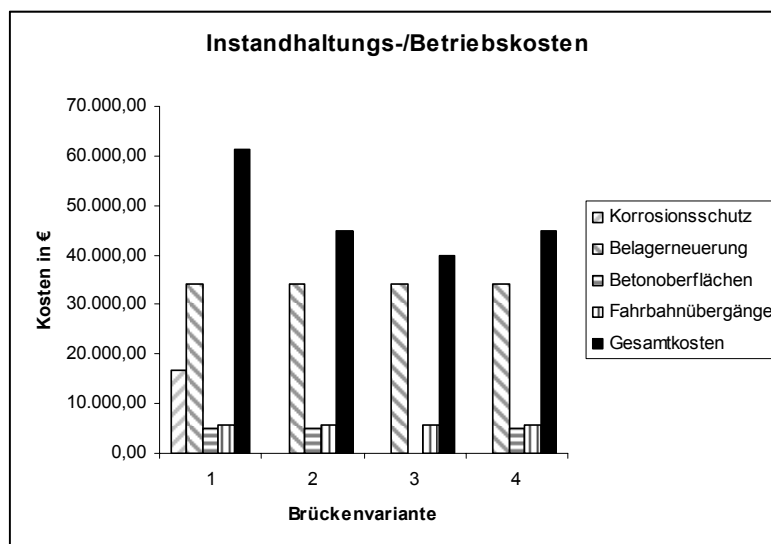


Abbildung 17 Instandhaltungs- /Betriebskosten

#### (4) Kosten für Haupt- und einfache Prüfungen

Die Kosten für Haupt- und einfache Prüfungen werden nach [29] ermittelt. Hierbei werden die Gebühren für Personal, Begutachtungsgerät sowie die Auswertung beachtet. Die Intervalle der Prüfungen sind in Kapitel 6.3.1 näher erläutert. Da laut [29] die Kosten für alle Prüfungen gleich anzusetzen sind, wird von einem allgemeinen Berechnungsprüfintervall von 3 Jahren ausgegangen.

In der Literatur finden sich Anhaltswerte für Brückenprüfkosten. Es ist jedoch zu bemerken, dass „für Bauwerke < 100 m<sup>2</sup> ... erhebliche Abweichungen von ... den ermittelten Mittelwerten“ [24] auftreten können. Für die nachfolgenden Untersuchungen wurden Mittelwerte aus [29] verwendet, siehe Tabelle 40.

Tabelle 40 Mittelwerte der Bauwerksprüfung

Kosten [€]	Hauptprüfung		einfache Prüfung	
Bauwerksfläche [m <sup>2</sup> ]	Stahlbrücke	Betonbrücke	Stahlbrücke	Betonbrücke
90	13,52	4,82	7,29	2,39
	<b>9,17</b>		<b>4,84</b>	

Es ergeben sich 18 Hauptprüfungen und 16 einfache Prüfungen bei einer 100jährigen Brückenbestandszeit. Die anfallenden Kosten sind Tabelle 41 zu entnehmen.

Tabelle 41 Brückenprüfkosten

Variante	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Hauptprüfung [€/m <sup>2</sup> ]	Einfache Prüfung [€/m <sup>2</sup> ]	Gesamtkosten*
1	90	9,17	4,84	<b>20.610,00</b>
2	90	9,17	4,84	<b>20.610,00</b>
3	90	9,17	4,84	<b>20.610,00</b>
4	90	9,17	4,84	<b>20.610,00</b>

## (5) Kostenzusammenstellung

Um eine effiziente Arbeitsweise mit dem Tool Prozedere zu garantieren, werden in den folgenden Abschnitten die Kosten entsprechend der Eingabestruktur aufbereitet. In Abbildung 18 ist ein Ausschnitt der Eingabemaske dargestellt.

		Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Grundlagenermittlung	[tsd €]	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Vorplanung	[tsd €]	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Entwurfsplanung	[tsd €]	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Genehmigungsplanung	[tsd €]	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Ausführungsplanung	[tsd €]	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Material - Herstellung	[tsd €]	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Lohn - Herstellung	[tsd €]	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Geräte - Herstellung	[tsd €]	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Material - Unterhalt	[tsd €]	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Lohn - Unterhalt	[tsd €]	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Geräte - Unterhalt	[tsd €]	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Ausfallkosten - Unterhalt	[tsd €]	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Personal	[tsd €]	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Betriebsstoffe	[tsd €]	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Abbruch	[tsd €]	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Entsorgung	[tsd €]	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Renaturierung	[tsd €]	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

Abbildung 18 Eingabemaske der Kosten [Prozedere]

In der nachfolgenden Tabelle 42 werden die anfallenden Kosten entsprechend des Eingabeschemas aufbereitet. Hierbei sind die Kosten von der Grundlagenermittlung bis zur Entwurfsplanung zusammengefasst worden. Im Eingabefeld „Material – Herstellung“ werden die Herstellkosten, welche in Kapitel 7.3.1 (1) ermittelt worden, eingegeben. Die Planungskosten für die Vorbereitung der Vergabe bis zur Objektbetreuung werden als „Lohn – Herstellung“ zusammengefasst. Die Instandsetzungs- und Betriebskosten finden als „Material - Unterhalt“ Berücksichtigung. Die Kosten der Brückenprüfungen werden als Kriterium für den „Lohn – Unterhalt“ herangezogen.

Tabelle 42 Kosten für Prozedere – Eingabe aufbereitet

Kosten [€]	Quelle	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Grundlagenermittlung		-	-	-	-
Vorplanung		-	-	-	-
Entwurfsplanung		-	-	-	-
Genehmigungsplanung		-	-	-	-
<b>Ausführungsplanung</b>	7.3.1(2)	14.619,19	14.115,99	15.070,56	13.817,19
<b>Material - Herstellung</b>	7.3.1(1)	87.414,73	85.255,94	92.601,32	82.956,66
<b>Lohn - Herstellung</b>	7.3.1(2)	3.839,74	3.759,95	4.008,03	3.682,29
Geräte - Herstellung		-	-	-	-
<b>Material - Unterhalt</b>	7.3.1(3)	61.370,85	44.751,13	39.869,33	44.751,13
<b>Lohn - Unterhalt</b>	7.3.1(4)	20.610,00	20.610,00	20.610,00	20.610,00
Geräte - Unterhalt		-	-	-	-
Ausfallkosten - Unterhalt		-	-	-	-
Personal		-	-	-	-
Betriebsstoffe		-	-	-	-
Abbruch		-	-	-	-
Entsorgung		-	-	-	-
Renaturierung		-	-	-	-

In Tabelle 42 wird deutlich, dass nur einige Kostenkriterien im Rahmen dieser Arbeit Beachtung finden konnten. Jedoch ist diese detaillierte Aufschlüsselung durchaus sinnvoll, denn das Tool Prozedere lässt sich nicht nur für den Einsatz in der Planung sondern auch für laufende Untersuchungen gebrauchen. Die Gerät – Herstellungs-, Gerät – Unterhalts-, Ausfallkosten – Unterhalts-, Personal-, Betriebsstoff-, Abbruch-, Entsorgungs- und Renaturierungskosten sind im Einsatz laufender Bauwerksüberprüfungen zur Bewertung heranzuziehen. Es kann auf diesem Wege im Nachhinein die Effizienz bewertet werden und eventuelle Schwachstellen für spätere Projekte ausgeschlossen werden.

Dies ist im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der Verwendung von Anhaltswerten nicht möglich. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass der Ausschluss von Kriterien den Einsatz der EWM nicht behindert.

### 7.3.2 Ökologie

In der nachfolgenden Tabelle 43 sind die ökologischen Brückengewichte der einzelnen Varianten berechnet. Grundlage für die Berechnung sind die MIPS – Werte des Wuppertal – Instituts [32], siehe Anhang – MIPS - Werte, Abschnitt 3.

Die MIPS – Werte für Stahl und Beton des Wuppertal – Instituts können ohne Änderung (Abwandlung) verwendet werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Herstellungsweisen der einzelnen Hersteller ist vom Wuppertal – Institut kein MIPS – Wert für GFK – Pultrusionsprofile angegeben. Somit wird in der vorliegenden Arbeit dieser Wert aus den Einzelbestandteilen, 55% Fasern (Glasfasern und Kohlefasern) und 45% Füllstoff (Vinylester), für das Profil (vgl. Kapitel 5.2.4) zusammengestellt. Die Kohlefasern werden aufgrund des geringen Einflusses vernachlässigt. Für Vinylester wird, aufgrund der nicht vorhandenen Daten, Polyester verwendet.

In den MIPS – Werten der einzelnen Baustoffe sind keine Transportvorgänge berücksichtigt. Diese Tatsache ist in dem geringen Einfluss des Transports auf die ökologische Betrachtung begründet, vgl. hierzu Gesprächsprotokoll Ritthoff, M. im Anhang - 2.4.2. Laut Ritthoff werden „Transportvorgänge fast immer überbewertet.“

Trotz des geringen Einflusses, von nur wenigen Prozentpunkten des Transports auf die Gesamtbilanz, werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit für den Beton 200 km und für alle weiteren Baustoffe 5000 km angenommen. Die angenommenen Transportstrecken sind als theoretisch zu bezeichnen. Die Transportwege von Abbau, Transport zur Fabrik, Weg zum Händler und zur Baustelle werden weitaus größer sein, sind aber nur sehr schwer abschätzbar. Vor allem die Transportwege der GFK – Profile sind als fiktiv anzusehen, da sie momentan nur in Amerika hergestellt werden. Dennoch ist die prinzipielle Fertigung der Pultrusionsprofile auch in Europa denkbar. Aus diesem Grund wurden für alle Baustoffe als

Transportmittel der Straßengüterverkehr herangezogen und gleiche Entfernungen angenommen, um die Ergebnisse vergleichbar zu machen und allen Produkten die gleiche Ausgangssituation zu gewähren. Die Betrachtung der Transportaufwendungen erfolgt im Hinblick auf die Verantwortung der Planer und Investoren. Auch wenn ein Produkt in anderen Regionen der Welt günstiger herzustellen ist und der Einfluss des Transport nahezu „vernachlässigbar ist“, sollte dies im Sinne einer ökologischen und verantwortungsbewussten Konstruktion vermieden, bzw. beachtet werden.

In Tabelle 43 werden neben den ökologischen Gewichten der ökologische Quotient nach Gleichung 7.1 ermittelt. Hierbei wurde zum einen das ökologische Gewicht auf das Brückengewicht, sowie das ökologische Brückengewicht inklusive der Transportvorgänge auf das tatsächlich messbare Gewicht bezogen. Die Stahl / Beton –Verbundvariante stellt in der vorliegenden Arbeit die Ausgangsvariante dar, somit wird der ökologische Quotient der GFK – Varianten (Variante 2 – 4) auf diese Variante bezogen. Zur besseren Verdeutlichung wird die Stahl / Beton – Variante auf 100% ökologischen Faktor normiert und die nachfolgenden Varianten in Abhängigkeit davon angegeben.

$$\text{Ökologiequotient [ÖQ]} = \frac{\text{ökol. Gewicht}}{\text{Brückengewicht}}$$

*Gleichung 7.1 Ökologiequotient*

Der Unterschied zwischen dem Ökologiequotienten und dem ökologischen Rucksack besteht darin, dass im ökologischen Rucksack nur einzelne Baustoffe betrachtet werden. Im Ökologiequotienten ist ein komplettes Bauwerk betrachtet. Somit kann man sagen, dass der Ökologiequotient als Serviceeinheit die Einheit „1 Brücke“ hat und der ökologische Rucksack den Referenzwert „1 Tonne Baustoff.“

Es ist also möglich die ökologischen Eigenschaften eines gesamten Bauwerks zu betrachten und nicht nur einzelner Baustoffe.

Tabelle 43 ökologische Massen der Brücken

### Berechnung der reinen Brückenmassen sowie der ökologischen Brückenmassen

Baustoff	MI- [t/t]	Brückenvariante							
		1		2		3		4	
		Masse [t]	ökol. Masse [t]	Masse [t]	ökol. Masse [t]	Masse [t]	ökol. Masse [t]	Masse [t]	ökol. Masse [t]
<b>Stahl</b>									
abiotisch	8,14	13,86	112	3,60	29,30	3,60	29,30	3,60	29,30
Wasser	63,70	13,86	882	3,60	229	3,60	229,32	3,60	229,32
Luft	0,44	13,86	6	3,60	1,58	3,60	1,58	3,60	1,58
<b>Beton</b>									
abiotisch	1,33	69,63	92	67,95	90,37	48,60	64,64	58,28	77,51
Wasser	3,40	69,63	236	67,95	231	48,60	165,24	58,28	198,14
Luft	0,04	69,63	3	67,95	2,99	48,60	2,14	58,28	2,56
<b>Glasfasern</b>									
abiotisch	6,22			2,10	13,07	2,65	16,47	2,10	13,07
Wasser	94,50			2,10	198	2,65	250,21	2,10	198,54
Luft	2,09			2,10	4,39	2,65	5,53	2,10	4,39
<b>Matrix</b>									
abiotisch	5,11			1,72	8,78	2,17	11,07	1,72	8,78
Wasser	188,00			1,72	323	2,17	407,26	1,72	323,17
Luft	2,90			1,72	4,98	2,17	6,27	1,72	4,98
<b>Gewicht</b>		<b>83,49</b>	<b>1.334,21</b>	<b>73,65</b>	<b>1.137,53</b>	<b>57,01</b>	<b>1.189,03</b>	<b>65,70</b>	<b>1.091,35</b>

### Berechnung der Tonnenkilometer sowie der ökol. Brückenmassen inkl. Transport

		Brückenvariante							
		1		2		3		4	
Transport- entfernung	[km]	[tkm]	[t]	[tkm]	[t]	[tkm]	[t]	[tkm]	[t]
	Stahl	5.000							
Beton	200								
Glasfasern	5.000								
Matrix	5.000								
	t/tkm								
<b>Straßen- güter- verkehr</b>									
abiotisch	0,0001	83.226	8,91	50.690	5,42	51.790	5,54	48755	5,22
Wasser	0,0009	83.226	77,15	50.690	46,99	51.790	48,01	48755	45,20
Luft	0,0001	83.226	8,49	50.690	5,17	51.790	5,28	48755	4,97
			<b>1.428,76</b>		<b>1.195,12</b>		<b>1.247,87</b>		<b>1.146,73</b>

Ökologie		ÖQ	in %	ÖQ	in %	ÖQ	in %	ÖQ	in %
		15,98	100	15,44	96	20,86	130	16,61	103
		17,11	100	16,23	94	21,89	127	17,46	102

Die in den vorangegangenen Abschnitten ermittelten Massen werden in der nachfolgenden Tabelle 44 für die Verarbeitung mit dem Tool – Prozedere entsprechend der Eingabe in Anlehnung an Abbildung 19 aufbereitet.

<b>Rohmaterial</b>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<b>ökologischer Rucksack</b>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<b>Abbau</b>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<b>Transport</b>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<b>Herstellung</b>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<b>Nutzung</b>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<b>Treibhauseffekt</b>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<b>Ozonschichtabbau</b>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<b>Versauerung</b>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<b>photochemische Oxydation</b>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Abbildung 19 Prozedere; Eingabe der Ökologie

Tabelle 44 Ökologie; Aufbereitung für Prozedere – Eingabe

	Brückenvariante			
	1	2	3	4
<b>Rohmaterial</b>	83,49	73,65	57,01	65,70
<b>ökologischer Rucksack</b>	1.334,21	1.137,53	1.189,03	1.091,35
<b>Abbau</b>	1	1	1	1
<b>Transport</b>	1.428,76	1.195,12	1.247,87	1.146,73
<b>Herstellung</b>	1	1	1	1
<b>Nutzung</b>	1	1	1	1
<b>Treibhauseffekt</b>	1	1	1	1
<b>Ozonschichtabbau</b>	1	1	1	1
<b>Versauerung</b>	1	1	1	1
<b>photoch. Oxydation</b>	1	1	1	1

## **8 Auswertung und Wichtungsvariation**

### **8.1 Allgemeines**

Die im Kapitel 5 vorgestellten Brücken werden mit Hilfe des Tools Prozedere bewertet. Hierbei werden die im Kapitel 7 ermittelten Beiwerte verwendet. In den folgenden Abschnitten wird ein Überblick über die Eingabe in das Tool gegeben. Des Weiteren werden die vom Prozedere – Tool ermittelten Effizienzen vorgestellt.

Hierbei wird auf die Variation der Wichtung und die Möglichkeit der unterschiedlichen Normierung der einzelnen Kriterien und Kriteriengruppen eingegangen.

### **8.2 Auswertung**

Im Rahmen der Arbeit wird die Möglichkeit der unterschiedlichen Wichtungen ausgenutzt.

Die Variation findet auf zwei Ebenen statt. In der ersten Ebene [vgl. Kapitel 3.2.2] wird der dynamische Wichtungsfaktor zwischen Standard, Extravagant oder Ausgewogen ausgewählt. In der zweiten Ebene [vgl. Kapitel 3.2.1] fließen die einzelnen Kriterien mit Hilfe der prozentualen Anteile an der Kriteriengruppe ein.

In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Wichtungen und die Auswirkung auf das Ergebnis dargestellt.

#### **8.2.1 Auswertungsvarianten**

Eine Bewertung des Nutzens getrennt vom Aufwand, oder umgekehrt ist aufgrund der Definition der Effizienz nicht möglich. Die Effizienz errechnet sich nach Gleichung 8.1 als Division von Nutzen zu Aufwand. Somit ist die differenzierte Betrachtung von Nutzen und Aufwand für den Anwender oftmals interessant, aber das Ergebnis nicht als Effizienz zu bezeichnen.

$$\text{Effizienz} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}}$$

Gleichung 8.1 Effizienzwertberechnung

Aus diesem Grund erfolgt eine Betrachtung der in Tabelle 45 aufgeführten Auswertungsvarianten.

Tabelle 45 Auswertungsvarianten

Auswertungsvarianten		Beschreibung
1	<b>Nutzen</b>	reine Nutzungsbewertung (Tragen, Erleben, Gebrauchen)
2	<b>Aufwand</b> Ökonomie Ökologie	rein ökonomische Betrachtung
3		rein ökonomische Betrachtung
4	<b>Gesamt</b>	Bewertung der Effizienz Anwendung Prozedere-Tool Wichtungsvaariation

## 8.3 Bewertung

### (1) Bewertung des Nutzens

Aufgrund der Datenfülle und deren Unterschiedlichkeit in Art und Größe ist eine Bewertung mit „der Hand“ nicht ratsam. Somit ist die Verwendung des Programmtools – Prozedere auch bei einer reinen Bewertung des Nutzens anzustreben. Die zuvor ermittelten Daten sind dem Tool entsprechend Kapitel 7 zuzuführen und die entsprechende Wichtung vorzunehmen.

## (2) Bewertung des Aufwands

Die Betrachtung des Aufwands getrennt vom Nutzen stellt keine Bewertung der Effizienz dar, kann aber für den Bauherrn von Interesse sein. Somit wird im Nachfolgenden eine Betrachtung der Ökonomie und der Ökologie vorgenommen. Hierzu wurden die ermittelten Werte Kapitel 7.3 entnommen.

### Ökonomie

Zur Bewertung der Ökonomie werden die Kosten Kapitel 7.3.1 entnommen. In Tabelle 46 ist die Zusammenstellung der anfallenden Kosten aufgeführt. Anhand dieser Aufstellung und der darauf aufbauenden Abbildung 20 kann eine Einordnung der Brückenvarianten stattfinden.

Tabelle 46 Kostenzusammenstellung

Brückenvariante	Quelle	1	2	3	4
Planungskosten	7.3.1 (2)	18.458,94	17.875,94	19.078,59	17.499,49
Gesamtbaukosten	7.3.1 (1)	87.414,73	85.255,94	92.601,32	82.956,66
Instandhaltung	7.3.1 (3)	61.370,85	44.751,13	39.869,33	44.751,13
Prüfkosten	7.3.1 (4)	20.610,00	20.610,00	20.610,00	20.610,00
<b>Gesamtkosten</b>		<b>187.854,52</b>	<b>168.493,01</b>	<b>172.159,24</b>	<b>165.817,28</b>
<b>Instandh./Baukosten</b>		70,21%	52,49%	43,05%	53,95%

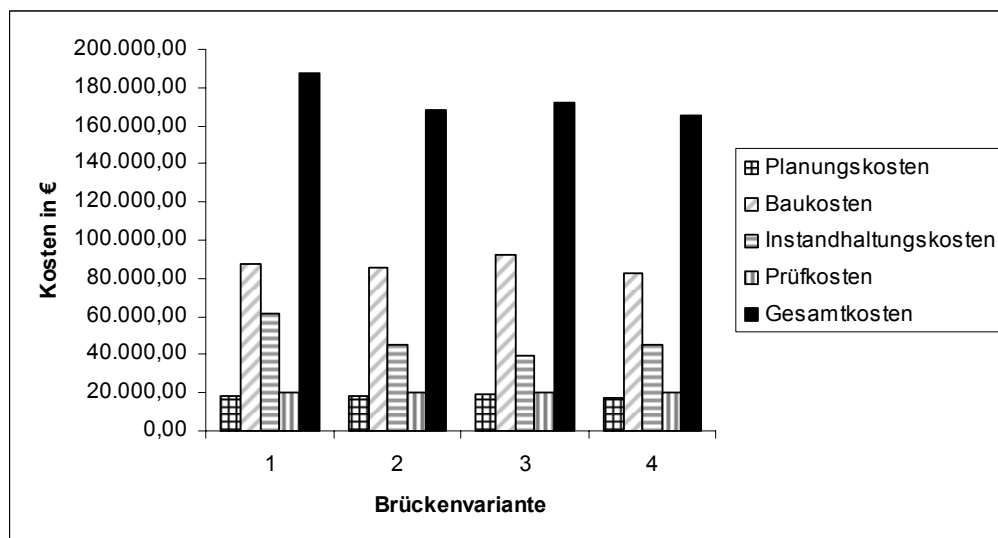


Abbildung 20 Gesamtkosten im Überblick

In Abbildung 20 zeigt sich, dass neben den Baukosten die Instandhaltungskosten einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtkosten haben. Die Prüf- und Planungskosten sind für alle Bauwerke in gleicher Höhe beziffert. Die Baukosten aller Varianten sind in etwa gleicher Höhe zu beziffern. Aufgrund der Instandhaltungsarbeiten variieren allerdings die Gesamtkosten stärker.

In Tabelle 46 wird in der untersten Zeile das Verhältnis von Instandhaltungsaufwand gegenüber den Baukosten dargestellt. Hierbei ist zu erkennen wie viel Prozent der Baukosten über den Bestandszeitraum für Wartungsarbeiten einzuplanen sind.

### **Ökologie**

Neben der rein ökonomischen Betrachtung der Brückenbauwerke ist ebenso eine ökologische Bewertung möglich. Hierzu sind die in Kapitel 7.3.2 ermittelten Massen zu verwenden. In Abbildung 21 ist das direkt messbare Brückengewicht angegeben. Die nach dem MIPS – Verfahren [Siehe Kapitel 6.3.2] ermittelten ökologischen Brückenmassen sind in Abbildung 22 unter Vernachlässigung der Transportwege und in Abbildung 23 unter Einbeziehung der Transportvorgänge dargestellt. Aufgrund des geringen Einflusses der Transportaufwendungen sind die ermittelten ökologischen Gewichte nahezu gleich groß. Dies sollte man nicht mit ökologischer Vertretbarkeit von sehr langen Transportwegen gleichsetzen. Die Zusammenlegung (Konzentration von Industrie) von Abbau, Herstellung und Einbau sollte aus ökologischer Sicht weiterhin favorisiert werden, wird aber im Rahmen der Globalisierung nicht durchzusetzen sein.

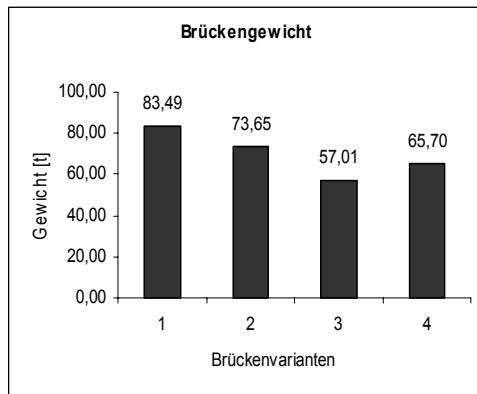


Abbildung 21 Brückengewicht

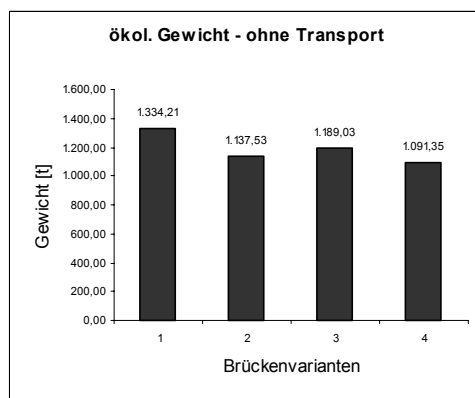


Abbildung 22 ökol. Gewicht – ohne Transport

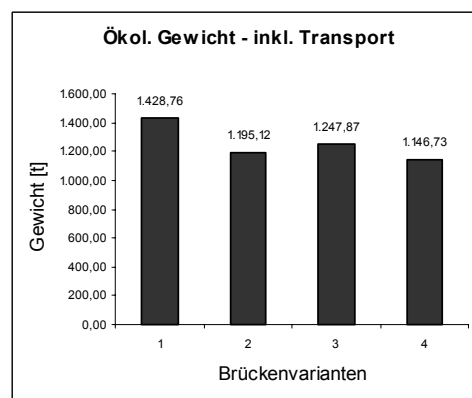


Abbildung 23 ökol. Gewicht – inkl. Transport

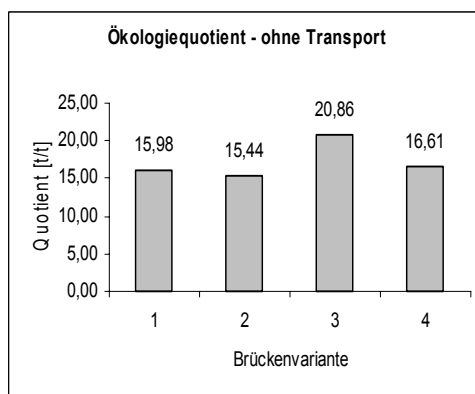


Abbildung 24 Ökologiequotient – ohne Transport

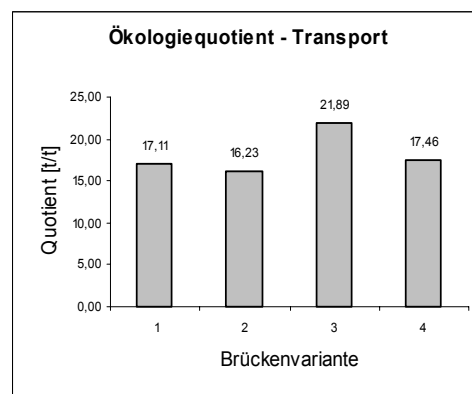


Abbildung 25 Ökologiequotient – mit Transport

In Abbildung 21 ist zu erkennen, dass die Stahl / Betonverbundbrücke die schwerste und Brückenvariante Nr. 3 (GFK / Beton + SAFPLANK®) die

leichteste Brücke ist. Diese Differenzen entstehen durch den Einsatz unterschiedlicher Baustoffe der Längsträger. Des Weiteren unterscheidet sich die Betondeckdicke, da die Verbundwirkung auf verschiedene Weise realisiert wird [siehe Kapitel 5].

Die Gegenüberstellung der ökologischen Gewichte ohne Beachtung des Transports (Abbildung 22) zeigt die notwendigen Aufwendungen infolge des Herstellungsprozesses auf. Hierbei ist zu verdeutlichen, dass Variante 3 (GFK / Beton + SAFPLANK) mit 57 Tonnen die leichteste Konstruktion ist, aber bei der Betrachtung des ökologischen Gewichts die zweit schwerste Variante nach der mit 83 Tonnen schweren Stahl / Beton – Lösung. Brücke Nr. 3 ist aufgrund des hohen GFK – Materialeinsatzes (Längsprofil und Plankenprofil) auch ökologisch schwerer als die Varianten 2 und 4. An dieser Gegenüberstellung erkennt man den ökologischen Herstellungsaufwand für glasfaserverstärkte Kunststoffe. Brückentypen 2 und 4 halten sich mit einem ausgewogenen GFK- und Betonanteil auch ökologisch die Waage.

Trotz des sehr geringen Einflusses des Transports, vgl. Abschnitt 7.3.2 und Gesprächsprotokoll A-2.4.2, wird dieser im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung in dieser Arbeit in die Bewertung mit einbezogen. In Abbildung 23 sind die ökologischen Gewichte inklusive aller Transportvorgänge angegeben. Bei der Auswertung der vorliegenden Grafik ist zu erkennen, dass das geringe ökologische Einflussgewicht des Transportgewichts hat. Anhand der Grafik ist zu erkennen, dass die Rangfolge der Massen gegenüber Abbildung 22 unverändert bleibt und die Werte lediglich um einen geringen Betrag zu nehmen.

Zur vergleichbaren Einschätzung der Ökologie der Brückenvarianten wurde mit Gleichung 7.1 der Ökologiequotient eingeführt. Mit Hilfe dieses Quotienten wird das ökologische Gewicht auf das tatsächlich messbare Brückengewicht bezogen. In Abbildung 24 ist der Quotient aus ökologischem Brückengewicht zu Brückengewicht dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass die Variante Nr. 3 den größten Quotienten aufweist. Alle

Brückenvarianten haben einen Anstieg im Quotienten in Folge Transport zu verzeichnen (vgl. Abbildung 24 und Abbildung 25). Dennoch ist zu erkennen, dass die Varianten 2 – 4 einen geringeren Anstieg haben als die Stahl / Beton – Verbundbrücke. Dieser Unterschied ist als minimal einzustufen, verdeutlicht jedoch die Transportaufwendungen für die schwerere konventionelle Variante.

In Tabelle 43 und Abbildung 26 ist der prozentuale Unterschied der einzelnen Varianten aufgeführt. Somit ist der Aufwand in Folge Transport der Variante 2 gegenüber der Ausgangsvariante um ca. 5% gesunken. Dem Gegenüber ist die Variante 3 aufgrund des Herstellungsaufwandes des GFK noch relativ hoch einzuschätzen. Jedoch ist das geringe Brücken- und Transportgewicht in der Abnahme des ökologischen Faktors beim Transport erkennbar, hierbei ist der größte Rückgang erzielbar.

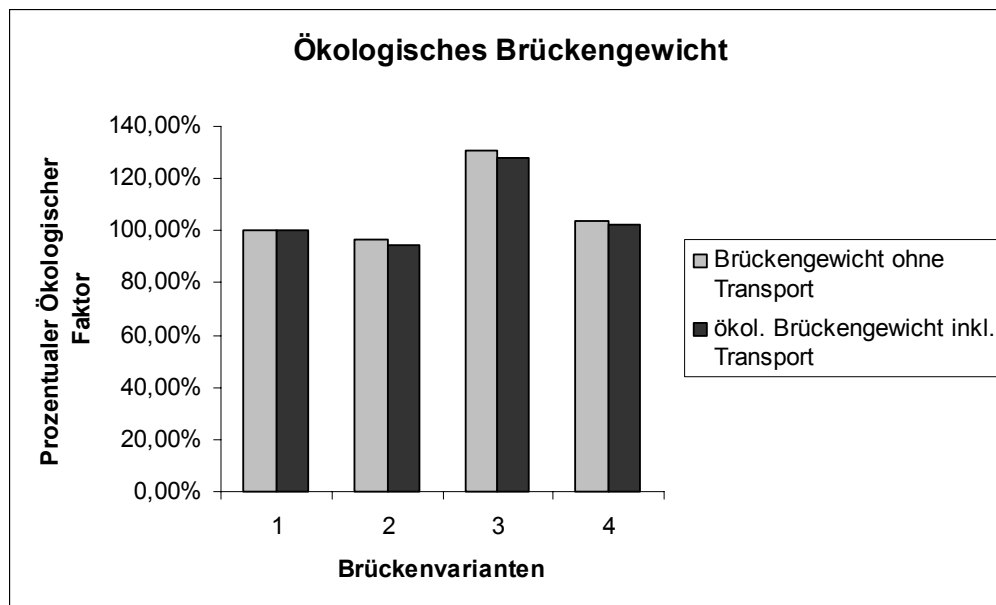


Abbildung 26 Ökologische Betrachtung in Prozenten

## 8.4 Effizienzwertberechnung mit Prozedere Tool

Die Bewertung mit dem Prozedere – Tool erfolgt unter Nutzung der möglichen Wichtungsvariation. Die verwendeten Wichtungen sind in Tabelle 47 angegeben. Für die vier Brückenvarianten werden 8 Wichtungsfälle (I – VIII) vorgegeben, in Ihnen wird der Nutzen (Tragen, Gebrauchen, Erleben) und der Aufwand (Ökonomie, Ökologie) wichtungsmäßig variiert.

Des Weiteren erfolgte aufgrund des nicht vorhandenen Umgebungsbezuges der Brückenvarianten eine Differenzierung zwischen der Einbeziehung optischer Kriterien (Tabelle 51) und deren Vernachlässigung (Tabelle 48 - Tabelle 50). Die angewandten optischen Kriterien beziehen sich auf Vergleiche unter den einzelnen Verbundbrücken, nicht deren Eingliederung in die Umgebung, siehe hierzu Kapitel 4.2.3(1).

Die Wichtungsvarianten 1, 7 und 8 stellen eine Standardbewertung dar. Eine Differenzierung findet in der Wahl des dynamischen Wichtungsfaktors statt. Die Wichtung innerhalb der Neben- und Hauptkriterien ist gleichmäßig verteilt. Die Wichtungen Nr. 2 – 6 stellen die Auswirkungen von speziell betrachteten Eigenschaften auf das Bewertungsergebnis dar.

Tabelle 47 Wichtungsvarianten

Wichtung - Nr.:	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
<b>Dyn. Wichtungsfaktor</b>	S	S	S	S	S	S	E	A
<b>Nutzen</b>								
Tragen	33%	33%	33%	100%	0%	0%	33%	33%
Gebrauchen	33%	33%	33%	0%	100%	0%	33%	33%
Erleben	33%	33%	33%	0%	0%	100%	33%	33%
<b>Aufwand</b>								
Ökonomie	50%	100%	0%	50%	50%	50%	50%	50%
Ökologie	50%	0%	100%	50%	50%	50%	50%	50%

S – Standard

E – Extravagant

A - Ausgewogen

Tabelle 48 Effizienzwertberechnung unter Vernachlässigung der optischen Kriterien – Variation des dynamischen Wichtungsfaktors

Wichtung - Nr.:	I				VII				VIII			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Brückenvariante												
<b>Nutzen</b>												
Tragen	52	48	48	48	53	47	47	47	51	49	49	49
Gebrauchen	54	51	46	46	56	50	44	44	52	51	48	48
Erleben	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
<b>Aufwand</b>												
Ökonomie [tsd. €]	188	168	172	166	188	168	172	166	188	168	172	166
Ökonomie	52	49	49	48	52	49	49	48	52	49	49	48
Ökologie	54	49	48	48	54	49	48	48	54	49	48	48
<b>Effizienz</b>												
Nutzen	52	50	48	48	53	49	47	47	41	50	49	49
Aufwand	53	49	48	48	53	49	48	48	53	49	48	48
<b>Auswertung</b>												
Effizienz	0,98	1,02	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,98	0,96	1,02	1,02	1,02
Rangfolge	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>

Tabelle 49 Effizienzwertberechnung unter Vernachlässigung der optischen Kriterien – Variation der Aufwandskriterien

Wichtung - Nr.:	II				III			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Brückenvariante								
<b>Nutzen</b>								
Tragen	52	48	48	48	52	48	48	48
Gebrauchen	54	51	46	46	54	51	46	46
Erleben	50	50	50	50	50	50	50	50
<b>Aufwand</b>								
Ökonomie [tsd. €]	188	168	172	166	188	168	172	166
Ökonomie	52	49	49	48	52	49	49	48
Ökologie	54	49	48	48	54	49	48	48
<b>Effizienz</b>								
Nutzen	52	50	48	48	52	50	48	48
Aufwand	52	49	49	48	54	49	48	48
<b>Auswertung</b>								
Effizienz	1,00	1,02	0,98	1,00	0,96	1,02	1,00	1,00
Rangfolge	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>

Tabelle 50 Effizienzwertberechnung unter Vernachlässigung der optischen Kriterien  
– Variation der Nutzenkriterien

<b>Wichtung - Nr.:</b>	<b>IV</b>				<b>V</b>				<b>VI</b>			
Brückenvariante	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
<b>Nutzen</b>												
Tragen	52	48	48	48	52	48	48	48	52	48	48	48
Gebrauchen	54	51	46	46	54	51	46	46	54	51	46	46
Erleben	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
<b>Aufwand</b>												
Ökonomie [tsd. €]	188	168	172	166	188	168	172	166	188	168	172	166
Ökonomie	52	49	49	48	52	49	49	48	52	49	49	48
Ökologie	54	49	48	48	54	49	48	48	54	49	48	48
<b>Effizienz</b>												
Nutzen	52	48	48	48	54	51	46	46	50	50	50	50
Aufwand	53	49	48	48	53	49	48	48	53	49	48	48
<b>Auswertung</b>												
Effizienz	0,98	0,98	1,00	1,00	1,02	1,04	0,96	0,96	0,94	1,02	1,04	1,04
Rangfolge	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>

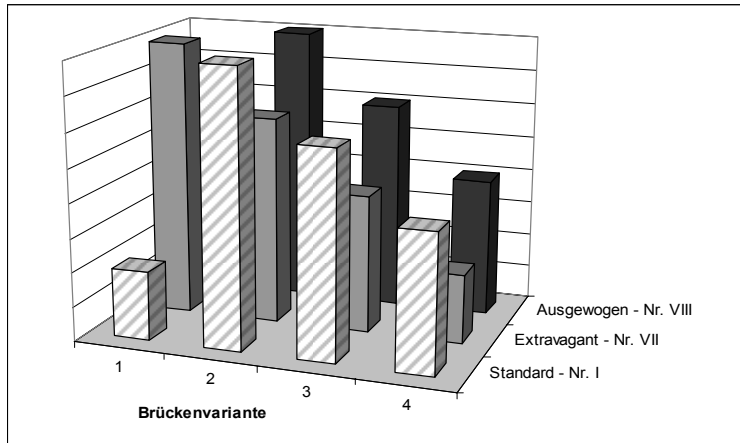


Abbildung 27 Einfluss des dynamischen Wichtungsfaktor auf Effizienzbewertung

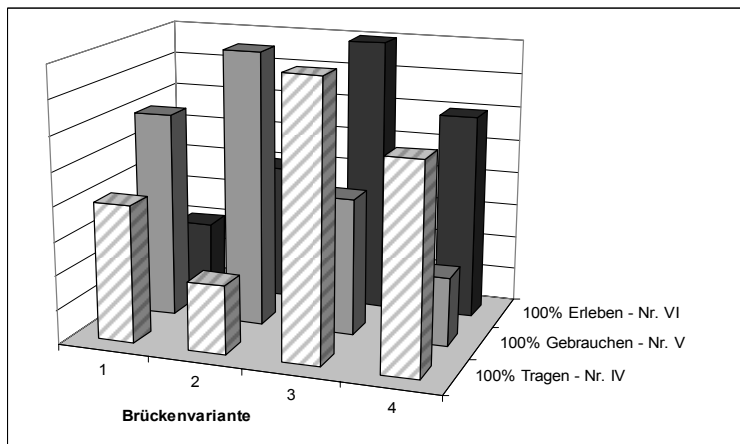


Abbildung 28 Variation der Nutzenbeiwerte

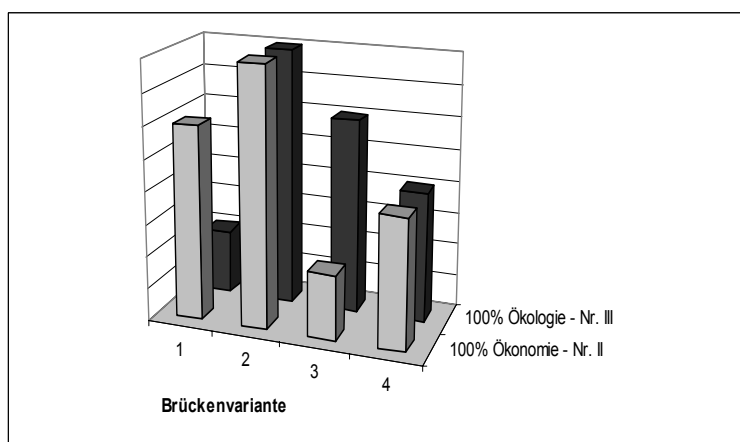


Abbildung 29 Variation der Aufwandsbeiwerte

#### **8.4.1 Auswertung der EWM – Anwendung**

Die Wichtungsvaarianten I, VII und VIII stellen die Auswirkungen des dynamischen Wichtungsfaktors dar. In diesen Vaarianten werden die Einzelwertungen gleichmäßig ausgewogen verteilt. Brückenvaariante 2 liegt bei der Verwendung des Standard und Ausgewogenen dynamischen Faktors auf erster Stelle. Die Extravagante Lösung hebt die vorteilhaften Eigenschaften der Stahl/Beton – Vaariante hervor.

In Wichtungsvaariante II ist die Ökonomie im Kriterium des Aufwands mit 100% bewertet. Somit werden neben den Kriterien des Nutzens (Tragen, Gebrauchen, Erleben) nur die ökonomischen Einflüsse bewertet. Hierbei schneidet die Brückenvaariante Nr. 2 (GFK – Längsträger mit Betondeck und Profilstäben zur Erzielung der Verbundwirkung) am besten ab. Die konventionelle Stahl / Beton – Vaariante ist auf Platz 2 zu finden. Die GFK / Beton – Brücke mit SAFPLANK – Profilen ist aufgrund der hohen Kosten die unökonomischste Vaariante.

Die Betrachtung der Ökologie neben den Nutzenkriterien erfolgt in Wichtungsvaariante Nr. III. Brückenvaariante Nr. 2 ist die ökologischste Brücke unter Beachtung der Kriterien des Nutzens. Die klassische Stahl / Beton – vaariante hat aufgrund des hohen Gewichts am schlechtesten abgeschnitten. Demgegenüber ist Vaariante Nr. 3 auf Platz 2 und somit im vorderen Feld zu finden.

Die Bewertung des Kriteriums Tragen (Vaariante IV) neben den gleichgewichteten Kriterien Ökonomie und Ökologie favorisiert Brücke Nr. 3. Die GFK / Betonbrückenvaariante mit Filigranplatte (Nr. 4) wird als zweit beste Brücke eingestuft.

Brückenvaariante Nr. 2 wird in Wichtungsvaariante V als Brücke mit dem höchsten Gebrauchswert eingestuft. Die konventionelle Vaariante Nr. 2 ist auf Rang 2 zu finden.

Das Kriterium Erleben (Variante VI) wird von Brücke Nr. 3 am besten erfüllt. Hierbei scheidet die Stahl / Betonvariante, aufgrund der geschalteten Untersicht und somit ungleichmäßigen Qualität, am schlechtesten ab.

An den Ergebnissen ist erkennbar, dass der Einsatz von GFK als Längsträger unter den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Randbedingungen als Alternative herangezogen werden kann. In den häufigsten Fällen wird Brückenvariante Nr. 2 favorisiert. Variante Nr. 3 würde unter kostengünstigeren und besseren ökologischen Herstellungsbedingungen öfter den 1.Rang einnehmen.

Als Fazit der Bewertung wird deutlich, dass durch den Einsatz von GFK als Längsträger gegenüber der Stahlvariante ökonomischere wie auch ökologischere Brücken errichtet werden können.

Tabelle 51 Effizienzwertberechnung unter Einbeziehung der optischen Kriterien

Wichtung - Nr.:	I				VII				VIII			
Brückenvariante	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
<b>Nutzen</b>												
Tragen	52	48	48	48	53	47	47	47	51	49	49	49
Gebrauchen	54	51	46	46	56	50	44	44	52	51	48	48
Erleben	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
<b>Aufwand</b>												
Ökonomie [tsd. €]	188	168	172	166	188	168	172	166	188	168	172	166
Ökonomie	52	49	49	48	52	49	49	48	52	49	49	48
Ökologie	54	49	48	48	54	49	48	48	54	49	48	48
<b>Effizienz</b>												
Nutzen	52	50	48	48	53	49	47	47	51	50	49	49
Aufwand	53	49	48	48	53	49	48	48	53	49	48	48
<b>Auswertung</b>												
Effizienz	0,98	1,02	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,98	0,96	1,02	1,02	1,02
Rangfolge	4	1	2	3	1	2	3	4	4	1	2	3

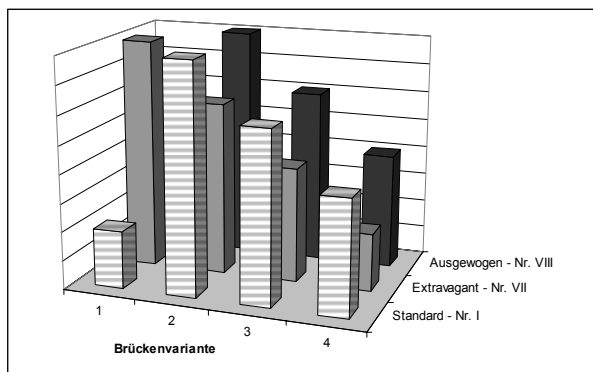


Abbildung 30 Einfluss des dyn. Wichtungsfaktor auf Effizienzbewertung – inkl. Opt. Kriterien

Bei der Betrachtung der Optik konnte aufgrund der Rahmenbedingungen kein Umgebungsbezug und somit keine Wechselwirkung der Tragwerke mit der Umwelt hergestellt werden. Somit wurden die Brückenvarianten untereinander verglichen. Da die Varianten eine sehr ähnliche Struktur und Erscheinungsform haben (2 Träger, 100gon...) sind keine qualitativen Vor- und Nachteile in die Bewertung eingeflossen. Aus diesem Grund hat sich das Ergebnis gegenüber Tabelle 48 nicht verändert.

Dennoch sollte im Rahmen einer ganzhaltigen Bewertung nicht von vornherein auf die Bewertung der Optik verzichtet werden, es sind immer die Rahmenbedingungen zu prüfen.

## **9 Zusammenfassung und Ausblick**

### **9.1 Zusammenfassung**

#### **Aufgabenstellung**

In der vorangegangenen Studienarbeit wurden Verbundbrückenkonstruktionen des Stahl/Beton und GFK/Beton – Verbundbaus entworfen und berechnet. Des Weiteren wurden erste Vergleiche hinsichtlich der Tragfähigkeit und Wirtschaftlichkeit angestellt. Mit der vorliegenden Arbeit erfolgt darauf aufbauend eine ganzheitliche Bewertung der in der Studienarbeit entwickelten Vorzugsvarianten nach der Effizienzwertmethode (EWM).

#### **Effizienzwertmethode**

Die Effizienzwertmethode wurde an der Bauhaus-Universität Weimar entwickelt. Die EWM hat gegenüber anderen Bewertungsverfahren aufgrund der Gegenüberstellung des Nutzens zum Aufwand den Vorteil besser nachvollziehbar und umfassend zu sein. Zur Effizienzwertermittlung mittels der EWM ist ein Kriterienkatalog zwingend notwendig und stellt somit die Basis der Methode dar. Ein großer Vorteil der EWM besteht in der Möglichkeit der Variation der Wichtungsfaktoren. Hierbei können die einzelnen Kriterien unterschiedlich hoch gewichtet werden. Somit kann jeweils eine kritische Betrachtung der Hauptkriterien (Tragen, Gebrauchen, Erleben, Ökonomie und Ökologie) und deren Auswirkung auf das Bewertungsergebnis erfolgen. Ebenso besteht die Möglichkeit der Hervorhebung einzelner Varianten aufgrund des dynamischen Wichtungsfaktors. Um eine Manipulation der Ergebnisse zu verhindern, ist es zwingend notwendig, die Kriterien der Wichtung vor Arbeitsbeginn festzulegen.

#### **Kriterienkatalog**

Die Bewertung wurde anhand des von Eisert erstellten Kriterienkatalogs vorgenommen. Die Anwendbarkeit und Relevanz der einzelnen Krite-

rien auf eine Brückenkonstruktion wurde kritisch hinterfragt und gegebenenfalls den Bedingungen einer Brücke angepasst.

Die Anpassung ist aufgrund der Universalität des Katalogs notwendig, da in dem vorliegenden Grundkatalog Gebäude des Hochbaus ebenso wie Brückenstrukturen enthalten sind.

Neben der Anpassung der Kriterien ist es unter Umständen von Nöten, die Skalen der Bewertung zu drehen und somit die Wichtigkeit den Anforderungen anzupassen.

### **Prozedere - Tool**

Das EWM Tool Prozedere ist zur einfachen Ermittlung der Effizienz verwendbar. Die Bearbeitung einer Bewertungsaufgabe ist durch die extern zu ermittelnden, bewertenden und zu normierenden Einzelkriterien aufwendig. Ebenso birgt die anschließende Zuführung der einzelnen Bewertungen einen gewissen Fehlergrad (Übertragungsfehler). Die Ausgabe erfolgt in einfacher Art und Weise anhand von Rangfolgen.

### **Anwendbarkeit der EWM, Kriterienkatalog auf Bewertungsaufgabe**

Die EWM und das Tool Prozedere sind auf die zu vergleichenden Verbundbrücken anwendbar. Hierbei ist nur eine gewisse Anpassung des Kriterienkatalogs notwendig.

### **Bewertung und Anwendbarkeit der Kriterien**

Die Bewertungsergebnisse verdeutlichen inwieweit eine spezifische Betrachtung der einzelnen Parameter möglich ist, ohne von Manipulation zu sprechen.

Die Kriterien des Tragens und Gebrauchs sind von hoher Relevanz. Der Kriterienkatalog ist auf diese beiden Kriterien anwendbar.

Ebenso ist die Bewertung der Ökonomie, sowie der Ökologie trotz des hohen Beiwertermittlungsaufwands von hoher Priorität.

Demgegenüber ist die Bewertung des Kriteriums Erleben in Bezug auf die Einschätzung von reinen Tragsystemen als schwierig einzustufen. Aufgrund der nicht vorhandenen Bebauungs- und Umgebungssituation ist kein Bezug zum „Geist des Ortes“ herzustellen und somit die opti-

sche Bewertung nur schwer durchzuführen. Aus diesem Grund ist eine Bewertung der Optik als schwierig einzustufen, wenn sie nicht sogar vernachlässigt werden sollte. In der Auswertung ist der geringe Einfluss der Optik aufgrund der schwer vorzunehmenden Bewertung zu erkennen.

### **Auswertung der Vergleichsbrückenkonstruktionen**

Die GFK/Beton – Varianten haben in Hinblick auf die Ökologie der Stahl/Beton - Variante einen entscheidenden Vorteil. Hierbei sei nicht nur der Aufwand infolge Herstellung sondern vor allem die geringen (nicht vorhandenen) Wartungsarbeiten über die Lebensdauer zu erwähnen. Des Weiteren ist der Transportaufwand aufgrund des geringeren Gewichts als vorteilhaft einzustufen.

Die Kosten für die unterschiedlichen Varianten (Stahl und GFK – Beton) sind aufgrund der Großabnehmerpreise identisch. Somit ist der Wartungsaufwand als wesentlicher Unterschied der Bauweisen anzusehen. Die GFK - Varianten sind vor allem nach Betrachtung der Lebensdauer als die kostengünstigsten Varianten anzunehmen.

Die Stahl/Beton - Variante erfüllt die an sie gestellten Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsanforderungen am besten. Dennoch sind alle Vergleichsbrücken als ausreichend dimensioniert einzustufen und erfüllen die jeweiligen Kriterien. Bei den GFK - Varianten ist das Kriterium der Durchbiegung als kritisch zu bezeichnen. Die zulässigen Durchbiegungen sind mit dem Bauherrn im Einzelfall abzustimmen.

## 9.2 Ausblick

Die ganzheitliche Bewertung von Tragsystemen ist im Hinblick auf die Verantwortung gegenüber späteren Generationen unabdingbar.

Die heutzutage übliche Betrachtung der Tragfähigkeit und der gestalterischen Eigenschaften neben den Kosten sollte um die ökologische Bewertung erweitert werden. Hierzu ist eine gewisse Sensibilität der Bevölkerung, der Planer und Investoren zu fördern.

Zur Bewertung der Effizienz ist es weiterhin notwendig, die Marktsituation, vor allem die Kosten für Herstellung, Errichtung, Wartung, Demontage und Renaturierung zu beobachten. Ebenso ist die Erweiterung der MIPS - Werte (Wuppertal - Institut) im Sinne einer exakten Bewertung der Ökologie erforderlich. Hierbei sind Herstellerfirmen genauso wie Institute gefragt.

Die Bewertung der Effizienz ist somit auch in Zukunft ein wichtiger Schritt, um Bauwerke jeglicher Art und die Folgen aus deren Entstehung im Ganzen zu erfassen. Um eine schnellere und einfachere Einordnung der Vergleichsvarianten durchführen zu können, muss das Prozedere Tool vervollständigt werden. Hierbei sollte ein komplettes Programm entstehen, welches die Aufbereitung, Normierung, Bewertung und Auswertung geschlossen umfasst.

Die Anwendung von GFK im Verbundbrückenbau ist nach Auswertung der Effizienzwertmethode als sinnvolles Konkurrenzprodukt zu Stahl-Verbundbrücken zu sehen. Jedoch sollte es zu keiner Pauschalisierung kommen, sondern die jeweilige Konstruktion ist entsprechend der Geometrie-, Einwirkungs- und Materialparameter zu prüfen.

Weitergehende Aufgaben sind, um die Anwendung von glasfaserverstärkten Kunststoffen im Bauwesen zu ermöglichen, die allgemeinen Zulassungen voranzutreiben. So können die Kosten und der erhöhte Zeit- und Nachweisaufwand für eine Sonderzulassung gespart werden und die Hemmschwelle des Einsatzes sinken.

## Literaturverzeichnis

### (1) Zitierte Fachliteratur

- [1] Ameling, D.:  
*<http://www.ariva.de/board/189373/thread.m?a=&jump=1719477&>*
- [2] Ameling, D.; Kerkhoff, H. J.:  
**Stahl in der Wertschöpfungskette**  
*Wirtschaftsvereinigung im Stahl-Zentrum, Pressemitteilung 9.Nov. 2004*
- [3] Bense, M.:  
**Ästhetik als Programm Konstruktion**
- [4] Dobler, H.-D.; Doll, W.; Fischer, U.:  
**Fachkunde Metall**  
*Europa Lehrmittel*
- [5] Eisert, D.:  
**Bewertung von Bauwerken mit der Effizienzwertmethode**  
Untersuchung zur ganzheitlichen Qualität  
*Dissertation, Bauhaus – Universität Weimar, 2004*
- [6] Fiberline A/S Composites:  
**Fiberline Konstruktionshandbuch**  
*Kolding 2003*
- [7] Garnich, R.:  
**Konstruktion, Design und Ästhetik**  
allgemeine mathematische Methode zur objektiven Beschreibung  
ästhetischer Zustände im analytischen Prozeß und zur generativen  
Gestaltung im synthetischen Prozeß von Design-Objekten  
*Dissertation, Universität - Stuttgart, 1967*
- [8] Gscheidle, R.:  
**Fachkunde Fahrzeugtechnik**  
*Europa Lehrmittel*
- [9] Heidenreich, Ch.:  
**Vergleich Verbundbauweisen Stahl/Beton und GFK/Beton**  
*Studienarbeit, Bauhaus – Universität Weimar, 2004*
- [10] ITW Plexus:  
**Technisches Datenblatt – Plexus M**
- [11] Locher, H.:  
**HOAI**  
Honorartabellenbuch in Euro-Werten  
*Werner Verlag, Düsseldorf, 2001*

- [12] Lünser, H.:  
**Ökobilanzen im Brückenbau – eine umweltbezogene, ganzheitliche Bewertung**  
*Birkhäuser – Verlag, Berlin, 1999*
- [13] Mitteilungen der Gesellschaft für Verantwortung in der Wissenschaft e.V.:  
**Wissenschaftler und Verantwortung**  
*7. Jahrgang, Nummer 1, März 1998*  
[http://staff-www.uni-marburg.de/~gvw/texte.gvw/7j1\\_98\\_1.html](http://staff-www.uni-marburg.de/~gvw/texte.gvw/7j1_98_1.html)
- [14] Nävy, J.:  
**Facility Management**  
Grundlagen, Computerunterstützung, Einführungsstrategie, Praxisbeispiele  
*2. aktualisierte und erweiterte Auflage*  
*Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2000*
- [15] Riedel, M.:  
**Ansätze zur Bestimmung des Nutzens von Tragwerken im Kontext mit der Effizienzwertmethode**  
*Diplomarbeit, Bauhaus – Universität Weimar, 2002*
- [16] Scheuermann, J.:  
**Mehr Planung für weniger Kosten**  
Ermittlung der Lebenszykluskosten  
*Deutsches Ingenieurblatt: Technik & Innovation, S.20- 27, Juni 2000*
- [17] Schilling, S.:  
**Beitrag zur Lösung ingenieurtechnischer Entwurfsaufgaben unter Verwendung Evolutionärer Algorithmen**  
*Dissertation, Bauhaus – Universität Weimar, 2003*
- [18] Schneider:  
**Bautabellen für Ingenieure**  
*Werner Verlag, Düsseldorf, 13. Auflage, 1998*
- [19] Schöck:  
**Technische Informationen Schöck ComBAR**
- [20] Sorg, S.:  
**Erstellung eines Kriterienkataloges zur Bestimmung von Tragwerken im Rahmen der Effizienzwertmethode**  
*Diplomarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2002*
- [21] Keil, A.:  
**Weit und krumm**  
Zum Entwurf gekrümmter, seilgestützter Fußgängerbrücken  
*Stahlbau, Ernst & Sohn, Berlin Heft 12, 2004*

- [22] Stahl-Informationszentrum:  
**Stahlbau-Lehrprogramm**  
*CD-Rom, 1.Ausgabe 2003*
- [23] Strongwell:  
**Extren DWB Design Guide**  
*Strongwell Corporation, Virginia, 2003*
- [24] Strongwell:  
**Fiberglass Flooring and Decking Systems**  
*Strongwell Corporation, Virginia*
- [25] Umweltdatenbank:  
**Energie - Definition**  
*<http://www.umweltdatenbank.de/lexikon/energie.htm>*
- [26] Verkehrsbau Professur:  
**Skripte zum Brückenbau**  
*Bauhaus-Universität Weimar*
- [27] Verkehrsblatt-Verlag:  
**Bauwerksprüfung nach DIN 1076**  
*Dokumentation 1997*
- [28] VDWF aktuell:  
**Explodierende Stahlpreise**  
*[http://vdwf-aktuell-online.de/Ausgabe\\_03-04/aktuell/article05.php](http://vdwf-aktuell-online.de/Ausgabe_03-04/aktuell/article05.php)*
- [29] Vollrath, F.; Tathoff, H.:  
**Handbuch der Brückeninstandhaltung**  
*2. Auflage, Verlag Bau + Technik GmbH, Düsseldorf, 2002*
- [30] Wikipedia:  
**Lexikon**  
*<http://de.wikipedia.org>*
- [31] Wirtschaftsvereinigung Stahl:  
**Stahl in der Wertschöpfungskette**  
*11/2004*
- [32] Wuppertal - Institut:  
**MIPS – Werte online**  
*<http://www.wupperinst.org/Projekte/mipsonline/>*

**(3) Zitierte Normen:**

- DIN 1045-1 *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 1: Bemessung und Konstruktion - Aufbau und Konstruktion. Juli 2001*
- DIN 1076 *Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung. November 1999*

**(4) Rechnergestützte Anwendungen**

MICROSOFT OFFICE 2003®

Prozedere (EWM – Bewertungstool)

**(5) Liste der Gesprächs- und Informationspartner**

- Claudia Kaiser (Wuppertal – Institut)
- Michael Ritthoff (Wuppertal – Institut)
- Glenn Barefoot (Strongwell Corporation, Virginia)
- Gerold Mann (Bürgermeister Klipphausen)
- Dietmar Greßmann (Straßenbauamt Schwerin)

# Anhang

## 1 GFK – Bewehrungshinweise

Die Eigenschaften von GFK – Bewehrungsstäben der Firma Schöck sind in nachfolgender Tabelle zusammengestellt, Tabelle 52.

Tabelle 52 Eigenschaften für gerade Stäbe, Firma Schöck

Eigenschaften	Bezeichnung	Werte	Bemerkung
Abmessungen	$A_s$	2,01 [cm <sup>2</sup> ]	Ø 16 mm
	$A_s$	8,04 [cm <sup>2</sup> ]	Ø 32 mm
Nenngewicht	$A_s$	0,48 [kg/m]	Ø 16 mm
	$A_s$	1,89 [kg/m]	Ø 32 mm
Zugfestigkeit	$\beta_z$	>1000 [N/mm <sup>2</sup> ]	-
empfohlene Spannung im Gebrauchszustand	$\sigma_{zul}$	250 [N/mm <sup>2</sup> ]	=0,42% Dehnung $\gamma_f = 4$
Zug E-Modul	$E_z$	60.000 [N/mm <sup>2</sup> ]	-
Biegezug E-Modul	$E_{Bz}$	60.000 [N/mm <sup>2</sup> ]	-
Druckfestigkeit	$\beta_D$	>500 [N/mm <sup>2</sup> ]	Bemessung auf Druck nur nach Rücksprache
Verbundspannung	$\tau_v$	10-15 [N/mm <sup>2</sup> ]	bei Versagen
Grundwert der Verbundspannung	$\tau_l$	1,8[N/mm <sup>2</sup> ]	Empfehlung für den Gebrauchszustand B25
Bruchdehnung	$\square$	1,8 [%]	-
Dichte		2,2[g/cm <sup>3</sup> ]	-

Laut Schöck® [19] kann nach den anerkannten Regeln der Technik bemessen werden (z.B. DIN 1045), wenn folgende Punkte eingehalten werden:

1. ComBAR® ist als schlaffe Bewehrung im Betonbau konzipiert. Als maximal zulässige Spannung im Gebrauchszustand (zul.  $S_s$ ) empfehlen wir 250 N/mm<sup>2</sup>, entsprechend einer Dehnung von 0,42%, nicht zu überschreiten. Im Verbundbereich I sollte als zulässige Verbundspannung die gleiche Verbundspannung wie bei Betonstahl angenommen werden. (Für Beton < B55).

2. Langzeitverformungen und Verbundkriechen von Betonstahl und ComBAR<sup>®</sup> sind vergleichbar.
3. Wegen des vergleichsweise geringen E-Moduls von ComBAR<sup>®</sup> gegenüber Stahl sollte der Begrenzung von Durchbiegungen und Rissbreiten am Bauwerk besonderes Augenmerk geschenkt werden.
4. Die Schubbewehrung von querkraftbelasteten Platten und Balken erfolgt bei ComBAR<sup>®</sup> am zweckmäßigsten mit schlupfarm arbeitenden Doppelkopfbolzen. Bügel sind auch möglich.
5. ComBAR<sup>®</sup>-bewehrte Bauteile verhalten sich duktil. Wie bei Stahl kündigt sich ein Versagen frühzeitig durch breite Risse und große Verformungen an.
6. Der thermische Längenausdehnungskoeffizient ist verträglich mit Beton. Risse oder Schäden als Folge von temperaturbedingten Volumenänderungen wurden bei Außenbauteilen nicht beobachtet.
7. Die maximal auftretende Dauergebrauchstemperatur sollte 60°C nicht überschreiten.
8. Eine Einstufung von ComBAR<sup>®</sup> hinsichtlich Brandverhalten ist noch nicht erfolgt. Bestehen Anforderungen seitens des Brandschutzes, sollten diese konstruktiv z.B. durch Brandschutzplatten analog zu Ausführungen mit anderen Bewehrungsmitteln gelöst werden.

Anhand der aufgeführten und verglichenen Werte kann man erkennen, dass ein Einsatz von GFK als Bewehrung möglich ist. Durch den Einsatz von GFK – Kopfbolzen zur Erzielung der Verbundwirkung und GFK – Längsbewehrung kann von einer materialgerechten Verbindungsform gesprochen werden.

## 2 Gesprächsprotokolle

### 2.1 Fiberline A/S

Emailkontakt mit Herrn Norbert Bieseke. Auslöser des Kontakts war die Erstellung der „ersten Fahrbrücke aus verstärktem Kunststoff“ Deutschlands.

Sehr geehrter Herr Bieseke,

im Rahmen meiner Diplomarbeit an der Bauhaus-Universität Weimar, Professur Massivbau II beschäftige ich mich GFK / Beton – Verbundbrücken. Über meine Betreuer Prof. Ruth und Dr. Bayer wurde ich auf die GFK – Brücke in Klipphausen aufmerksam gemacht. Hierzu habe ich ein paar Fragen an Sie als Vertreter der Fa. Fiberline vor Ort.

Wenn Sie die folgenden Fragen beantworten könnten würde ich mich sehr freuen.

Bei den Fragen nach Kosten ist es ausreichend wenn Sie Tendenzen angeben, richtige Kosten wären natürlich schöner. Ich kann aber verstehen wenn Sie aus Gründen des Datenschutzes keine Auskunft dazu geben können.

1. Handelt es sich bei der GFK – Brückenvariante um den Amtsentwurf oder stellt die ausgeführte Variante einen Sondervorschlag dar?

**Antwort:** Es handelt sich um einen Sondervorschlag der von einem Planungsbüro mit unserer Unterstützung erarbeitet wurde.

2. Die Investitionskosten von GFK – Brücken sind höher als bei vergleichbaren Stahl oder Betonbrücken. Wie viel teurer war Ihre GFK – Brücke?

**Antwort:** Der Brückenüberbau aus GFK hat in Klipphausen ca. 1400 €/m<sup>2</sup> gekostet. Je nach Art der Konstruktion liegt der Preis zwischen 800 und 3000 €/m<sup>2</sup>

3. Da die Wartungskosten von GFK – Brücken geringer sind als bei Stahlbrücken kann man über den Bestandszeitraum viel Geld sparen. Nach wie vielen Jahren werden sich die höheren Investitionskosten amortisiert?

**Antwort:** Nach 15 bis 30 Jahren.

4. Wie lang war die Bauzeit der Brücke? Können Sie sagen wie lange der Bau einer Stahl oder Betonbrücke gedauert hätte?

**Antwort:** Mit Stahl-oder Betonbrücken haben wir keine Erfahrungen. Nach Klärung aller technischen Fragen haben wir bis zur Realisation 4 Monate benötigt. Bei optimaler Abwicklung wären auch 2 Monate möglich gewesen.

5. Konnten Sie aufgrund des geringeren Gewichts kleinere (weniger aufwendige) Krane verwenden?

**Antwort:** Ja, denn der Brückenüberbau wiegt nur 5 to. Es reichte daher eine kleiner Kran aus. Das war von Vorteil, denn die Zufahrtsstrassen waren sehr eng.

## 2.2 Bürgermeister Klipphausen

Im sächsischen Klipphausen wurden im Nachgang der Elbeflut des Jahres 2002 vier Fußgängerbrücke in GFK – Bauweise und eine GFK – Fahrbrücke errichtet.

Es wurde ein telefonisches Interview am 26. 11 2004 mit dem Bürgermeister Herrn Gerold Mann geführt.

Herr Gerold Mann, Bürgermeister Klipphausen

Im Rahmen meiner Diplomarbeit an der Bauhaus-Universität Weimar beschäftige ich mich GFK / Beton – Verbundbrücken.

Im Rahmen meiner Rechercharbeit bin ich über Herrn Bieseke (Fa. Fiberline) auf Ihre neue GFK – Brücke aufmerksam gemacht worden. Hierzu hätte ich ein paar Fragen an Sie als Bauherr.

1. Wie sind Sie auf GFK – Brücken aufmerksam geworden?

Antwort: Im Vorleben KFZ - Meister. Somit waren die Eigenschaften von GFK bekannt und wurden schon selber ausprobiert (Heck- und Bugspoiler).

Leicht, witterungsbeständig

Hinweis wurde von einem Anbieter gegeben.

Eine Brücke wurde im Senftenberger Raum gebaut „Wucht in Nieten“, würde Herr Mann nie bauen. Über BASF Zentrum und Dr. Ramelow wurde die GFK – Brücke wieder in Erwägung gezogen. Es erfolgte Zusammenarbeit mit Planungsbüro und Firberline.

2. Die Investitionskosten von GFK – Brücken sind höher als bei vergleichbaren Stahl oder Betonbrücken. Wie viel teurer war Ihre GFK – Brücke?

Antwort: Im Allgemeinen sind GFK – Brücken 15% teurer.

In Klipphausen wurde eine Paket geschnürt, 4 Fußgängerbrücken und 1 Fahrbrücke => somit wurde der Preis gedrückt und war dem von Stahl – und/oder Betonbrücken gleich.

3. Da die Wartungskosten von GFK – Brücken geringer sind als bei Stahlbrücken kann man über den Bestandszeitraum viel Geld sparen. Nach wie vielen Jahren haben sich die höheren Investitionskosten amortisiert?

Antwort: Man spart über die Betriebsjahre viel Geld ein, aber es wäre zu keinem Bau gekommen, wenn die GFK – Brücken viel teurer gewesen wären.

4. Wie lang war die Bauzeit der Brücke? Können Sie sagen wie lange der Bau einer Stahl oder Betonbrücke gedauert hätte?

Antwort: Es sind nur ein paar Mann und ein sehr leichter kleiner Kran notwendig. Wenn die nächste Flut kommt, ist die Brücke in kürzester Zeit weg.

5. Konnten Sie aufgrund des geringeren Gewichts kleinere (weniger aufwendige) Krane verwenden?

Antwort: Ja, siehe 4

6. Welche Verkehrsbeschränkung ist auf der Brücke vorgeschrieben?

Antwort: 1 – spurige Verkehrsführung

## 2.3 Straßenbauamt Schwerin

Das Straßenbauamt Schwerin betreut die erste Brücke in GFK – Bauweise Deutschlands. Sie wurde 2003 als Bundesstraßenüberführung in nur einer Nacht errichtet.

Herr Greßmann hat als Leiter der Brückenbauabteilung für ein telefonisches Interview zur Verfügung gestanden (26. November 2004)

Sehr geehrter Herr Greßmann,

im Rahmen meiner Diplomarbeit beschäftige ich mich mit der Bewertung und Ausführung von GFK/Beton-Verbundbrücken.

Hierzu habe ich ein paar Fragen an Sie als Auftraggeber (Straßenbauamt Schwerin) der GFK-Brücke über die Bundesstraße 106, es würde mir sehr weiterhelfen wenn Sie ein paar dieser Fragen beantworten könnten:

- 1: Handelt es sich bei dem Entwurf in GFK um den Amtsentwurf oder ist diese Variante ein Sondervorschlag gewesen?

Antwort:

Es handelt sich um den Amtsentwurf, wurde gemeinsam mit dem BmVBw entwickelt. Land Mecklenburg – Vorpommern hat Entwurf bezahlt, BUND hat Kosten der Brücke getragen.

Es wurden keine Nebenangebote zugelassen.

GFK – Profile stammen aus Amerika, Brücke wurde vom ausführenden Betrieb (die die Widerlager hergestellt haben) 5-6 km vom endgültigen Standort entfernt auf dem Bauhof gefertigt. Transport stellte keine Probleme dar, gesamter Überbau wog nur 20t.

- 2: Welche Kriterien haben zur Entscheidung der Ausführung in GFK geführt (Kosten, Gewicht, Transportgewicht, Dauer der Straßensperrung)?

Antwort:

Es sollte ein Standort gewählt werden, bei dem alle Vorteile ausgespielt werden können. Kurze Sperrung der darunterliegenden Straße, sinnvolle Spannweite.

- 3: Wie hoch wurde die Senkung der Betriebskosten infolge geringerer Wartungsarbeiten eingeschätzt? Handelte es sich bei der Senkung der Betriebskosten um ein ausschlaggebendes Kriterium, oder sollte der Werkstoff GFK unter allen Umständen eingesetzt werden?

Antwort:

Es wird davon ausgegangen das neben Reinigungskosten (Graffiti, Sauberhalten) keine weitergehenden Wartungsarbeiten anfallen.

Diese Brücke befindet sich im Testlauf. Es wurden in der Nähe der Brücke Brückenteile im Bereich von Sprühnebel und anfallender Lauge aufgestellt und regelmäßig begutachtet. Des Weiteren wurden DMS aufgeklebt um die Lastfälle Wind, Sonne und Publikumsverkehr aufnehmen zu können. Es befindet sich ein Computer im Bereich des Widerlagers mit dem man per Fernabfrage die entsprechenden Daten auslesen kann. Hierzu wurde ein Büro beauftragt.

Die Brücke wurde für eine Nutzungsdauer von 80 Jahren dimensioniert.

Diese Brücke wurde als Bauteil im Einzelfall zugelassen, es müssen entsprechende Nachweise und Messwerte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Abteilung Brücke gegeben werden, damit dieses Brückenverfahren irgendwann als Regelbauwerk zugelassen werden kann.

- 4: Wie betrachten Sie die Brücke gut ein Jahr nach dem Bau? War die Wahl des Baustoffs GFK eine gute Wahl oder würden Sie sich heute anders entscheiden?

Antwort:

Lange Vorarbeit, Interesse des Herrn Greßmann. Erstes Interesse 1983 aufgekeimt, GFK – Brücke in Bulgarien. 1997 Thema neu aufgegriffen, von Brücke in Kolding gehört, Entscheidung „das können wir auch“

Diese Brücke wurde ausgeschrieben. Es wurden keine Fiberline – Profile verwendet, da zu teuer. Profile aus Amerika verwendet.

Reine Baukosten der Brücke 600.000 €, aber enorme Kosten für Prüfinstitute und laufende Kontrollen. Kosten für Zulassung im Einzelfall, speziell zugelassene Prüfer sind notwendig.

Es wurde die TU Darmstadt kontaktiert, hatten Erfahrung mit GFK – Bewehrung.

## 2.4 Wuppertal – Institut

### 2.4.1 Kaiser, Claudia

Sehr geehrter Herr Heidenreich,

durch einen Kollegen im Wuppertal Institut habe ich von Ihrer Diplomarbeit zur Ökologie von Tragwerken an der Universität Weimar erfahren.

Wie es scheint, befinden wir uns beide auf der Suche nach Werten zum Energieverbrauch bei der Herstellung Glasfaserverstärkter Kunststoffe. Ich würde mich deshalb sehr freuen, wenn Sie bereit wären, mir Auskunft zu geben, falls Sie fündig werden. (Dies werde ich meinerseits natürlich ebenfalls tun, falls ich mehr Erfolg haben sollte.)

Eine mögliche Quelle für Ökobilanzdaten, die Studenten häufig zugänglich ist, sind u.a. die Datenbibliotheken in der Ökobilanzierungssoftware Umberto. Häufig haben die Rechenzentren von Universitäten Lizenzen für diese Software.

Da Sie zur Ökologie von Tragwerken arbeiten, könnten Sie sich für die Untersuchung „Der Werkstoff Stahl im Vergleich zu Konkurrenzstoffen“ interessieren, die vom Wuppertal Institut im Auftrag der Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V. verfasst wurde. Leider wird sie von der Studiengesellschaft kostenpflichtig (18,00 € + Versand) vertrieben, weshalb ich kein .pdf-Dokument an diese Mail hängen kann.

Sie dürfte aber über eine Bibliotheks-Fernleihe auch so erhältlich sein. In der Studie wurden unter anderem Tragrahmen aus Stahl, Stahlbeton und Holz im Hinblick auf lebenszyklusweiten Ressourcenverbrauch, Wasserinput, KEA und GWP betrachtet.

Nach Abschluß Ihrer Diplomarbeit würde ich mich sehr freuen, wenn Sie mir ein Exemplar (per Mail) zukommen lassen würden, da auch ich mich für das Thema interessiere.

Viel Glück bei der Anfertigung Ihrer Diplomarbeit.

Mit freundlichen Grüßen aus Wuppertal

Claudia Kaiser

### **2.4.2 Ritthoff, Michael**

Sehr geehrter Herr Heidenreich,

herzlichen Dank für Ihr Interesse an unserer Arbeit.

Faserverstärkte Kunststoffe werden jeweils spezifisch hergestellt.

Insofern können wir keine Werte für GFK oder CFK angeben. Mit der Angabe der einzelnen Einsatzstoffe wollen wir diesem Umstand gerecht werden und ermöglichen, die jeweils spezifischen Werkstoffe zu berechnen. Der Energieanteil während der Produktion ist vergleichsweise gering (viel manuelle Arbeit) und kann leider nicht all-gemeingültig abgeschätzt werden.

Mit freundlichen Grüßen

Michael Ritthoff

Sehr geehrter Herr Heidenreich,

Bei den MIT-Werten wurden mit wenigen Ausnahmen keine Transporte berücksichtigt. Die Ausnahmen haben Ihre Ursache nur darin, dass einigen verwendeten Sachbilanzen die Transporte nicht herausgerechnet werden konnten. Sporadische Überprüfungen ergaben jedoch, dass praktisch bei allen betrachteten Stoffen der Einfluss der Transporte nur im einstelligen Prozentbereich liegt. Problematisch bei Transporten ist, dass der Einfluss des Abnehmers auf den Transportwege recht erheblich ist und daher nur schlecht gemittelt werden kann.

Das Thema "Transport" wird fast immer überbewertet. Sowohl bei MIPS als auch bei "Ökobilanzen nach ISO 14040" gibt es nur wenige Fälle wo die Transporte relevant sind. Transporte sind relevant wenn:

-ein Lufttransport erfolgt,

-extrem einfache Produkte weit transportiert werden (Mineralwasser, Trinkwasser (hier ist der "Transport" berücksichtigt), Sand), -sehr leichte Produkte ("unkomprimierte Luft") weit transportiert werden (Dämmstoffe etc.).

Die "Tatsache" dass heute viel Stahl aus China eingeführt wird ist nach meinem Eindruck keine solche. China hat selber einen hohen Stahlbedarf und importiert Stahl in erheblichen Mengen. Deutschland deckt seinen Bedarf an einfachen Stahlqualitäten im Wesentlichen aus dem europäischen Ausland. Hier sollte ein Blick in die Außenhandelsstatistik des Statistischen Bundesamtes, eigentlich in jeder UB vorhanden, angemessen Aufklärung bringen.

Der Stahlmarkt wie auch der Aluminiummarkt ist immer noch ein stark "regionaler" Markt. Die Regionen sind dabei aber recht groß (Europa, Asien/Pazific, Amerika). Erst allmählich kommt es hier zu Veränderungen, etwa mit den Planungen von TKS für ein neues Stahlwerk in Brasilien.

Mit freundlichen Grüßen

Michael Ritthoff

## 2.5 Strongwell Corporation

Die amerikanische Firma Strongwell mit Sitz in Virginia produziert GFK pultrudierte Profile. Diese Produkte wurden für die vorliegende Arbeit herangezogen.

In den nachfolgenden E-Mails wurden die Preise, welche für die Kalkulation notwendig waren, der Profile erfragt.

Christian,

We have just updated our pricing for our 36" EXTREN DWB for 2005. The pricing for a minimum quantity of 175 meters is approximately \$1400 USD per meter. The high volume pricing for quantities greater than 1200 meters is \$1100 per meter. Pricing for 500 meters is \$1280 per meter.

It will be very difficult to see the price drop below the \$1100 per meter due to the cost of the carbon fiber and other raw materials. Pultrusion is a process that raw materials in large quantities dominate the cost and it is very difficult to make meaningful cost reductions through lower labor (labor is only 6-7% of cost) or process/speed improvements. The cost of raw materials is what drives the cost of production for every pultruded part that we make.

I hope this helps complete your cost analysis on structural FRP products.

Regards,

Glenn Barefoot

### 3 MIPS - Werte

Auszug aus der MI – Tabelle des Wuppertal – Instituts vom 28.10.2003.

Tabelle 53 MIPS - Zusammenstellung

Material	Spezifikation	Materialintensität [t/t]			
		Abiotisch	Biotisch	Wasser	Luft
Metalle					
Stahl	Träger	8,14		63,7	0,444
Baustoffe					
Beton	B25	1,33		3,4	0,044
Sonstige					
Glasfasern	E-Glas	6,22		94,5	2,088
Kunststoffe					
Polyester	Harz	5,11		188	2,895
Transport					
Straßengüterverkehr				t/tkm	
	Lastzüge 8t	0,000107		0,000927	0,000102

## 4 HOAI – Beiwerte

Tabelle 54: Honorartafel §56

Honorartafel zu § 56 Abs. 2 (Anwendungsbereich des § 51 Abs. 2)

Anrechenbare Kosten Euro	Zone I		Zone II		Zone III		Zone IV		Zone V	
	von €	bis €	von €	bis €	von €	bis €	von €	bis €	von €	bis €
25 565	2 613	3.282	3 282	3.952	3.952	4.627	4.627	5.297	5.297	5.967
30.000	2 972	3 722	3 722	4.471	4.471	5.222	5 222	5.971	5.971	6 721
35.000	3 364	4.204	4.204	5.039	5 039	5.879	5.879	6.714	6 714	7 554
40.000	3 737	4.658	4.658	5 583	5.583	6.504	6.504	7.429	7 429	8.350
45.000	4 107	5 108	5 108	6 115	6 115	7 116	7 116	8 122	8 122	9 123
50.000	4.465	5.546	5.546	6.629	6.629	7.710	7.710	8.792	8.792	9 874
75.000	6 159	7.597	7.597	9.036	9.036	10.479	10.479	11 917	11 917	13.355
100.000	7.742	9.502	9.502	11 263	11 263	13.019	13.019	14.780	14.780	16 541
150.000	10 653	12.982	12.982	15.306	15.306	17.635	17.635	19 959	19.959	22 288
200 000	13.311	16 144	16 144	18.977	18.977	21 815	21 815	24.648	24.648	27 482
250 000	15 801	19.093	19 093	22 386	22 386	25.674	25.674	28.967	28.967	32.259
300 000	18 147	21 859	21 859	25 575	25 575	29.287	29.287	33.003	33.003	36 715
350 000	20 373	24.479	24.479	28 585	28 585	32.686	32 686	36.792	36 792	40 897
400 000	22 486	26.961	26.961	31 435	31 435	35.904	35 904	40.379	40 379	44 853
450 000	24.504	29.322	29.322	34 141	34 141	38.959	38 959	43.778	43.778	48 597
500 000	26 440	31 587	31 587	36.734	36.734	41 877	41 877	47.023	47.023	52 170
750 000	34 951	41 485	41 485	48.013	48.013	54.546	54.546	61 074	61 074	67.607
1 000 000	41 994	49.614	49.614	57.232	57.232	64.847	64.847	72.466	72.466	80.085
1 500 000	58.018	68 101	68 101	78.185	78 185	88.273	88.273	98.356	98 356	1 08 439
2 000 000	73 178	85 513	85 513	97.848	97.848	110 188	110 188	122 523	122 523	134.858
2 500 000	87.609	102.028	102 028	116.448	116.448	130 869	130.869	145.289	145.289	159.709
3 000 000	101 490	117.865	117 865	134.239	134.239	150.614	150.614	166 988	1 66 988	1 83 363
3 500 000	114 930	133 158	133.158	151 386	151 386	169 614	169.614	187.842	187 842	206 070
4 000 000	128.007	148 007	148 007	168.008	168 008	188 005	1 88 005	208 005	208 005	228 006
4 500 000	140.756	162 464	162 464	184 171	184 171	205 874	205 874	227 581	227 581	249 289
5 000 000	153.239	176 590	176 590	199.941	199 941	223 294	223 294	246 645	246 645	269 996
7 500 000	212 400	243 281	243 281	274 161	274 161	305 046	305 046	335 926	335 926	366 806
10000 000	267 906	305 559	305 559	343.212	343.212	380 870	380 870	418 523	418.523	456 176
15000 000	371 445	421 149	421 149	470 852	470 852	520 561	520 561	570 265	570 265	619 968
20 000 000	468 516	529 012	529.012	589 507	589 507	650 008	650 008	710.503	710.503	770 998
25 000 000	560 948	631 370	631 370	701 788	701 788	772.212	772.212	842 630	842 630	913 052
25 564 594	571 338	642 873	642 873	714.403	714.403	785 937	785 937	857 467	857 467	929 002

[Quelle: [11] Locher, H.:]

Tabelle 55: Honorartafel §65

## Honorartafel zu § 65 Abs. 1

Anrechenbare Kosten Euro	Zone I		Zone II		Zone III		Zone IV		Zone V	
	von €	bis €	von €	bis €	von €	bis €	von €	bis €	von €	bis €
10226	1 017	1 186	1 186	1 600	1 600	2096	2 096	2516	2516	2679
15000	1 399	1 621	1 621	2 168	2168	2827	2 827	3375	3375	3596
20000	1 771	2043	2043	2726	2726	3540	3540	4224	4224	4495
25000	2123	2445	2445	3249	3249	4214	4214	5019	5019	5340
30000	2469	2836	2836	3756	3756	4862	4862	5782	5782	6149
35000	2805	3217	3217	4248	4248	5481	5481	6512	6512	6924
40000	3 123	3580	3580	4717	4717	6088	6088	7224	7224	7681
45000	3447	3945	3945	5186	5186	6676	6676	7918	7918	8416
50000	3756	4294	4294	5636	5636	7245	7245	8588	8 588	9126
75000	5238	5961	5961	7770	7770	9941	9941	11 750	11 750	12474
100000	6629	7524	7524	9761	9761	12450	12 450	14686	14686	15 581
150000	9 242	10448	10448	13463	13463	17086	17086	20101	20101	21 308
200 000	11 702	13 195	13 195	16920	16 920	21 394	21 394	25 119	25119	26612
250 000	14047	15807	15807	20201	20201	25470	25470	29863	29863	31 623
300 000	16320	18332	18332	23355	23355	29378	29 378	34401	34401	36413
350 000	18 516	20769	20769	26391	26391	33 143	33143	38770	38770	41 018
400 000	20663	23 143	23143	29348	29348	36791	36791	42997	42 997	45476
450 000	22762	25467	25467	32227	32 227	40343	40343	47103	47103	49808
500 000	24816	27738	27738	35044	35044	43811	43811	51 113	51 113	54035
750 000	34583	38513	38513	48334	48334	60 125	60125	69945	69945	73 876
1 000 000	43787	48639	48639	60760	60760	75304	75304	87430	87430	92276
1 500 000	61 058	67572	67572	83852	83852	103394	103394	119675	119675	126 188
2 000 000	77 308	85342	85342	105417	105417	129515	129515	149 595	149 595	157624
2 500 000	92 842	102 291	102291	125904	125904	154244	154244	177858	177858	187306
3 000 000	107824	118607	118607	145562	145562	177909	177909	204 865	204 865	215 647
3 500 000	122 355	134415	134415	164557	164557	200 732	200 732	230 878	230 878	242 934
4 000 000	136522	149806	149806	183007	183007	222 857	222 857	256 059	256 059	269 342
4 500 000	150 366	164832	164832	200 987	200 987	244 381	244 381	280 540	280 540	295 002
5 000 000	163936	179545	179545	218567	218 567	265 393	265 393	304417	304417	320 025
7 500 000	228 489	249 391	249 391	301 642	301 642	364 343	364 343	416594	416594	437 496
10 000 000	289 333	315049	315049	379 337	379 337	456 484	456 484	520 772	520 772	546 488
15 000 000	403 375	437 772	437 772	523 761	523 761	626 947	626 947	712936	712936	747 333
15 338 756	411 079	446 061	446 061	533513	533513	638 455	638 455	725 907	725 907	760 889

[Quelle: [11] Locher, H.:]

## Erklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Weimar, 15.02.2005

CHRISTIAN HEIDENREICH