

Erzeugung künstlicher Messdaten einer geschädigten Brücke

**Fachveröffentlichung der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

bast



INGENIEURBÜRO
PROF. DR. U. FREUNDT

Entwurf, Statik und
Konstruktion von Brücken
und Ingenieurbauwerken

Erzeugung künstlicher Messdaten einer geschädigten Brücke

Z1kl-B1 Simumess VVoT6

Bestellung Nr. 4500052972

Auftraggeber: Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53
51427 Bergisch Gladbach

Datum: 30.09.2020

mail@ib-freundt.de
www.ib-freundt.de

Büro Weimar
Industriestraße 1a
99427 Weimar
Tel.: (0 36 43) 87 12 70
Fax: (0 36 43) 87 12 88

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Tragwerk.....	5
2.1.	Vorbemerkungen.....	5
2.2.	Beschreibung	5
2.3.	Sensorkonzept	6
3.	Verkehrseinwirkungen.....	9
3.1.	Abbildung des Verkehrs	9
3.1.1.	Grundprinzip	9
3.1.2.	Angewendete Vorgehensweise.....	10
3.2.	Datengrundlage aus Referenzobjekt	11
3.3.	Weitere Datengrundlagen	12
3.3.1.	Abbildung von genehmigungspflichtigem Schwerverkehr	12
3.3.2.	Abbildung von Stauverkehr	13
3.3.3.	Parameter für die Fahrzeuge	13
4.	Temperatureinwirkungen	14
4.1.	Vorbemerkungen.....	14
4.2.	Ermittlung der Klimaeinwirkungen	15
4.2.1.	Einführung	15
4.2.2.	Die ideelle Außenlufttemperatur.....	16
4.2.3.	Die ideelle Außenlufttemperatur für das Bauwerk 402e im Bereich des Autobahnkreuzes Nürnberg	16
4.2.4.	Innenlufttemperaturen des Hohlkastens.....	21
4.3.	Ermittlung von Temperaturverteilungen in Bauwerken	22
4.3.1.	Die Fouriersche Differentialgleichung	22
4.3.2.	Ermittlung der Temperaturfelder für die Brücke 402 e.....	25
4.4.	Ermittlung der Kenngrößen der Temperatureinwirkungen auf Brücken	27
4.4.1.	Allgemeines	27
4.4.2.	Kenngrößen der Temperatureinwirkungen für Brücken.....	27
4.4.3.	Aufstelltemperatur.....	29
4.5.	Die Kenngrößen der Temperatureinwirkung für die Brücke BW 402 e und das Jahr 2018	30
4.6.	Referenzen der ermittelten Temperaturen und Temperaturanteilen durch Messungen am Bauwerk 402e und durch Literaturangaben.....	32

5.	Tragwerksmodellierung	35
5.1.	Modellbeschreibung	35
5.1.1.	Allgemeines	35
5.1.2.	Schalen-Modell	35
5.1.3.	Balken-Modell	40
5.2.	Abbildung von Schädigungen	44
5.3.	Tragwerksreaktionen infolge Schädigungsszenarien	45
5.3.1.	Vorbemerkungen	45
5.3.2.	Äußere Beanspruchungen	45
5.3.3.	Temperaturbeanspruchungen	63
5.4.	Zeitliche Umsetzung der Schädigungsszenarien	65
6.	Dokumentation der erzeugten künstlichen Messdaten	66
6.1.	Daten- und Dateistrukturen	66
6.2.	Berücksichtigte Verkehrsparameter	68
6.3.	Berücksichtigte Temperaturdaten	71
6.4.	Visualisierungen zur Dokumentation	73
6.4.1.	Stündliche Maximal-, Minimal- und Mittelwerte	73
6.4.2.	Beispielzeitverläufe	78
7.	Zusammenfassung	79
8.	Literaturverzeichnis	80

1. Einleitung

Monitoringsysteme an Brückenbauwerken werden in Deutschland punktuell eingesetzt. In der Mehrzahl der Fälle liegt dabei die Zielstellung in der Weiterverfolgung bestehende Schädigungen am Tragwerk über eine verbleibende Restnutzungsdauer. In einzelnen Fällen werden Monitoringsysteme aber auch eingesetzt, um Verkehrsbeanspruchungen von Bauwerken zu erfassen. Im Zuge eines aktuellen Projektes im Auftrag des BMVI und der BASt wurde außerdem ein neu errichtetes Brückenbauwerk mit mehreren Monitoringsystemen ausgestattet.

Aktuelle Auswertungsmethoden mit Data-Mining-Algorithmen versprechen zukünftig großes Potenzial für automatisierte Erkennungen von Änderungen an Bauwerken durch eine entsprechende Auswertung von Daten aus Monitoringsystemen. Diese Methoden benötigen jedoch eine „Lernphase“, um die Charakteristik der Verläufe der Messdaten am ungeschädigten Tragwerk zu ermitteln. Treten im weiteren Verlauf Änderungen der Charakteristik infolge Schädigungen des Tragwerkes oder auch anderer Randbedingungen auf, so sollen die Methoden diese Änderungen gesichert erkennen.

Für eine systematische Erprobung dieser Methoden sowohl in der Lernphase als auch in der Überwachungsphase sind geeignete Referenzdaten, also Messdaten, aus beiden Phasen erforderlich. Vorhandene Monitoringsysteme können gegenwärtig solche systematischen Daten nicht liefern, da diese entweder an bereits geschädigten Tragwerken eingesetzt wurden oder im Verlauf realistischer Messdauern keine Änderungen eintreten.

Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist damit die Erzeugung von künstlichen Messdaten, die solche systematischen Erprobungen erlauben. Hierzu wird ein Referenzbauwerk gewählt und dieses „virtuell“ mit einem Monitoringsystem ausgestattet. Das Bauwerk wird in einem rechnerischen Tragwerksmodell abgebildet. Denkbare Schädigungsszenarien werden durch geeignete Änderungen des Tragwerksmodelles abgebildet.

Änderungen von Sensorwerten an einem Bauwerk über die Zeit folgen im Normalfall aus äußeren Einwirkungen auf das Bauwerk. Hierzu zählen im Brückenbau vorwiegend Verkehrs- und Temperaturbeanspruchungen. Im Zuge der vorliegenden Untersuchungen werden diese Beanspruchungen über Simulationsverfahren erzeugt (Verkehr) bzw. aus Klimadaten berechnet (Temperatur). Die Beanspruchungen werden auf die Tragwerksmodelle angesetzt und die Tragwerkreaktionen ermittelt. Aus den Tragwerkreaktionen werden die Werte an den virtuellen Sensorstellen abgeleitet. Bei der Abbildung der Beanspruchungen werden typische saisonale Effekte berücksichtigt.

Die Untersuchungen führen zunächst zu einem großen Datensatz von künstlichen Messdaten für das ungeschädigte Bauwerk. Diese Daten bilden die Grundlage für die Lernphase der angezielten Algorithmen. Des Weiteren werden Messdaten für die betrachteten Schädigungsszenarien künstlich erzeugt. Mit diesen Daten kann dann die Erkennung von Änderungen durch die Algorithmen geprüft werden.

Die vorliegenden Untersuchungen beschränken sich auf die Erzeugung der künstlichen Sensordaten. Analysen oder Entwicklungen der zuvor genannten Algorithmen zur automatisierten Erkennung von Änderungen sind nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Die nachfolgenden Erläuterungen dokumentieren die Untersuchungen hinsichtlich der Eingangsdaten, der Abbildung des Tragwerkes und der Schädigungen sowie der der Abbildung der Beanspruchungen. Des Weiteren werden die erzeugten Daten für eine Weiterverarbeitung strukturell dokumentiert und bereitgestellt.

2. Tragwerk

2.1. Vorbemerkungen

Im Zuge der vorliegenden Untersuchungen wurde das Bauwerk 402e im Bereich des Autobahnkreuzes Nürnberg, Richtungsfahrbahn Regensburg als Referenzbauwerk für die Modellierung des Tragwerkes verwendet. Hintergrund hierfür sind umfangreiche vorliegende Daten zum Bauwerk sowie zu Verkehrs- und Klimaeinwirkungen, die im Rahmen von laufenden Forschungsprojekten im Kontext des Gesamtprojektes „Digitales Testfeld Autobahn - Intelligente Brücke“ (vgl. [7], [2]) ermittelt wurden.

2.2. Beschreibung

Bei dem betrachteten Bauwerk handelt es sich um eine gekrümmte, vierfeldrige Spannbeton-Hohlkastenbrücke mit begehbarem einzelligen Hohlkasten. Die Einzelstützweiten betragen 37,8 m – 45,0 m – 44,0 m – 29,0 m. Die Gesamtbreite des Überbaus beträgt 15,4 m zwischen den Geländern. Die maximale Querschnittshöhe liegt bei 3,17 m und die Querneigung beträgt 5,5 %. Das Bauwerk ist sowohl intern (32 Spannglieder) als auch extern (6 Spannglieder) in Längsrichtung vorgespannt. Die Herstellung erfolgte im Taktschiebeverfahren.

In den nachfolgenden Darstellungen (Abbildung 1 bis Abbildung 3) sind Auszüge aus den zeichnerischen Unterlagen zum Bauwerk zusammengestellt. Abbildung 4 dokumentiert das eingesetzte Lagerungssystem.

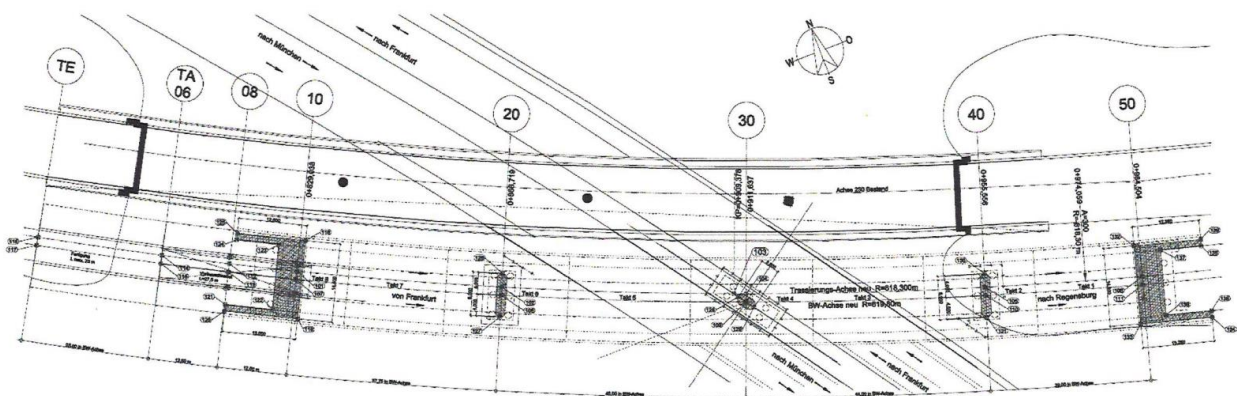


Abbildung 1: Draufsicht BW 402e

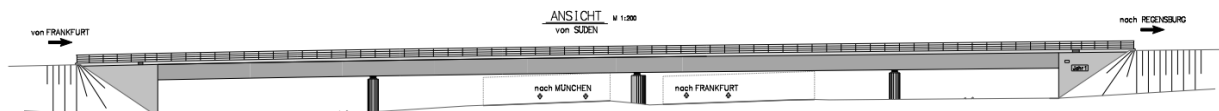


Abbildung 2: Längsschnitt BW 402e

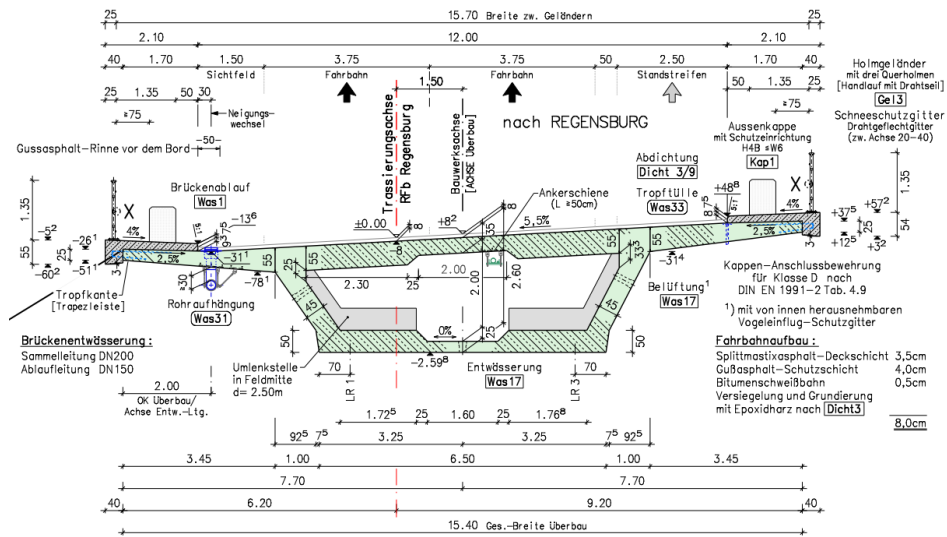


Abbildung 3: Regelquerschnitt BW 402e

ANGABEN ZUR LAGERUNG		Bemessungswerte (Design-Werte)				
		y				
		x				
ACHSE		10	20	30	40	50
LAGERREIHE		○	⊕	⊕	⊕	⊕
1		○	⊕		⊕	⊕
2				⊕		
3		⊕	⊕		⊕	⊕

Abbildung 4: Lagerungssystem BW 402e

2.3. Sensorkonzept

In Anlehnung an die Leistungsbeschreibung zum Auftrag und in Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde das nachfolgend dargestellte „virtuelle“ Sensorkonzept entwickelt. Das betrachtete Bauwerk wird darin in 5 Messquerschnitten mit Sensoren ausgestattet. In Abbildung 5 und Abbildung 6 sind Prinzipdarstellungen des Längsschnittes des Bauwerkes aufgeführt. Die Messquerschnitte sind zwischen Achse 40 und Achse 50 angeordnet. Abbildung 7 bis Abbildung 11 zeigen die einzelnen Messquerschnitte mit den darin berücksichtigten „virtuellen“ Sensorpositionen. Messquerschnitt 1 (Achse 40) und Messquerschnitt 2 (Achse 50) beinhalten dabei Neigung- und Verschiebungssensoren. Die übrigen Messquerschnitte beinhalten neben einem Neigungssensor 4 Dehnungssensoren. Die Dehnungssensoren sind dabei auf der Unterseite der Fahrbahnplatte und der Oberseite der Bodenplatte jeweils in der Mitte des Querschnittes angesetzt. Die beiden weiteren Sensoren bilden eine Dehnungsmessung an der Bewehrung im Querschnitt ab.

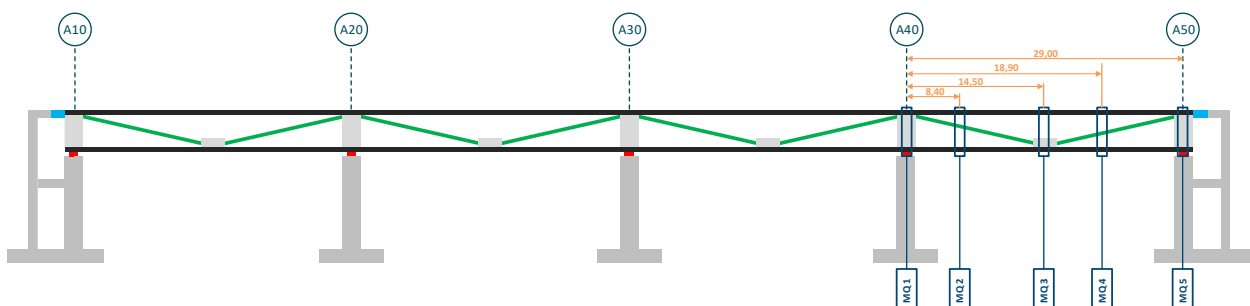


Abbildung 5: Sensorkonzept – Längsschnitt gesamt – Prinzipdarstellung ohne Maßstab

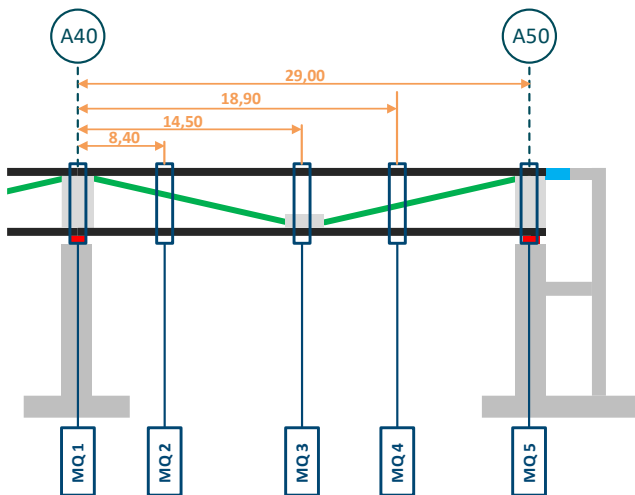


Abbildung 6: Sensorkonzept – Längsschnitt, Bereich zwischen Achse 40 und Achse 50 – Prinzipdarstellung ohne Maßstab

MQ 1

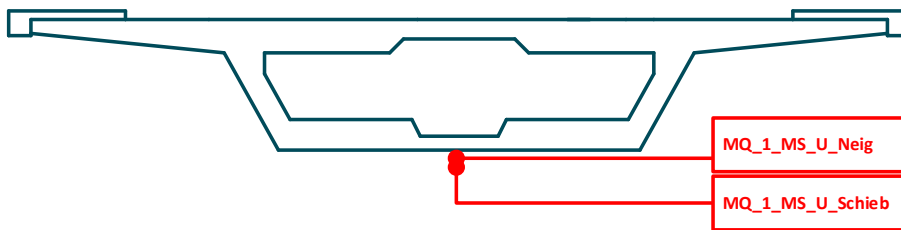


Abbildung 7: Sensorkonzept – Querschnitt – Messquerschnitt 1 – Prinzipdarstellung ohne Maßstab

MQ 2

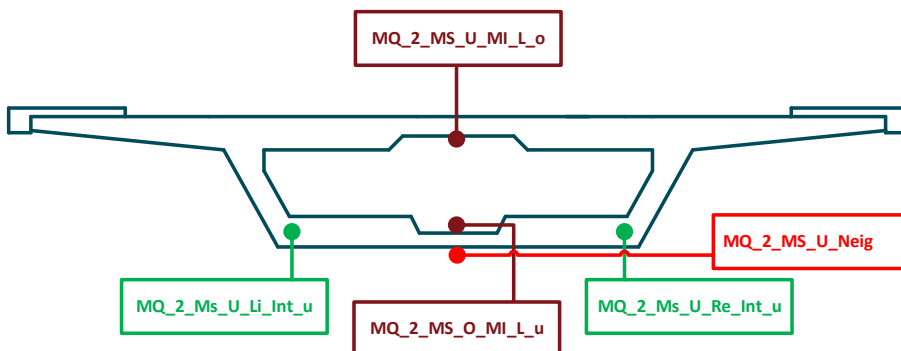


Abbildung 8: Sensorkonzept – Querschnitt – Messquerschnitt 2 – Prinzipdarstellung ohne Maßstab

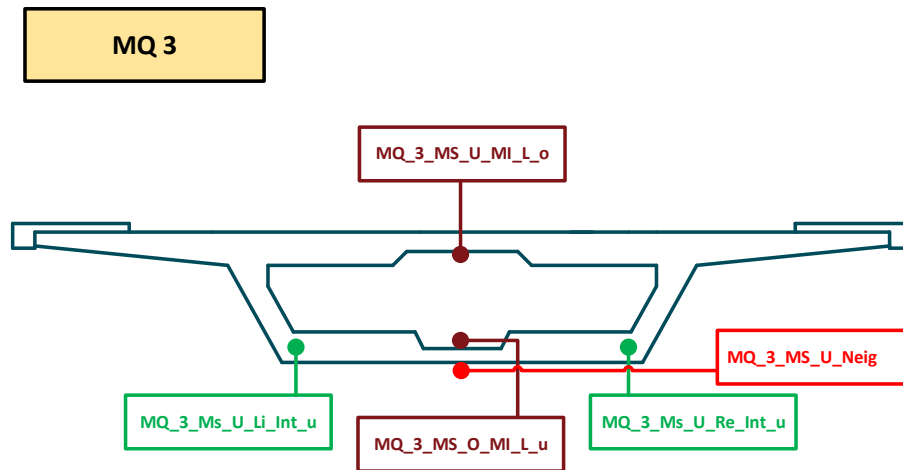


Abbildung 9: Sensorkonzept – Querschnitt – Messquerschnitt 3 – Prinzipdarstellung ohne Maßstab

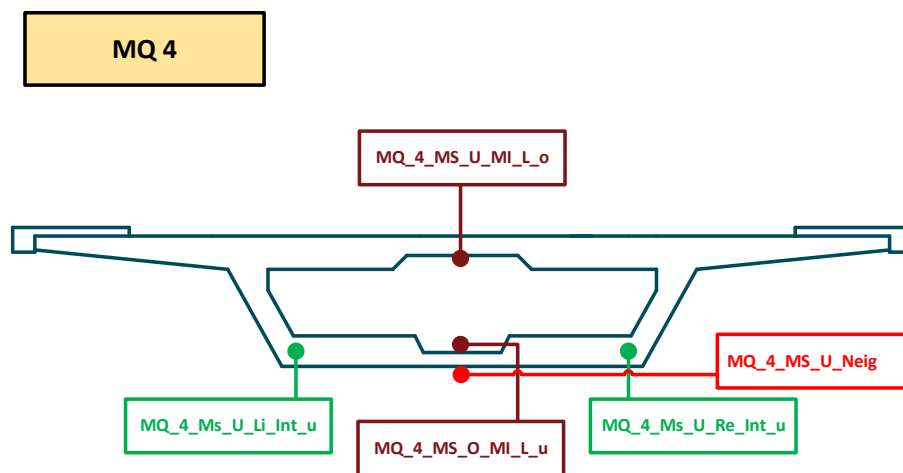


Abbildung 10: Sensorkonzept – Querschnitt – Messquerschnitt 4 – Prinzipdarstellung ohne Maßstab

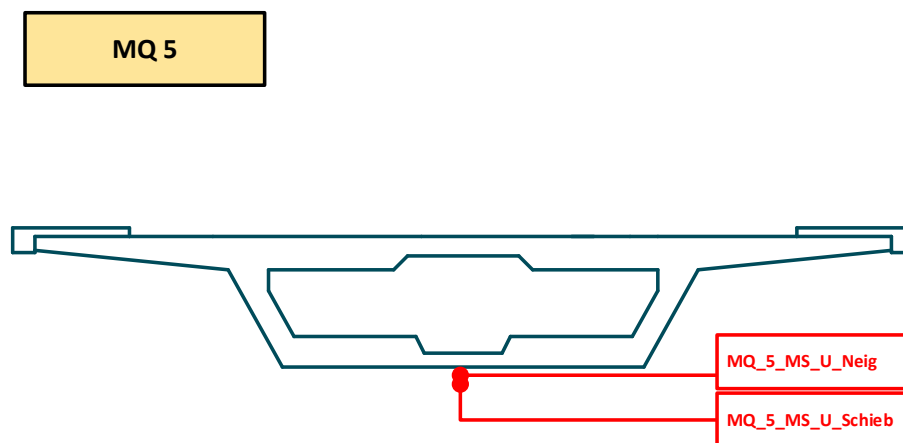


Abbildung 11: Sensorkonzept – Querschnitt – Messquerschnitt 5 – Prinzipdarstellung ohne Maßstab

3. Verkehrseinwirkungen

3.1. Abbildung des Verkehrs

3.1.1. Grundprinzip

Im Rahmen von mehreren Forschungsprojekten im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (ehemals Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) und der Bundesanstalt für Straßenwesen und einer Dissertation wurde eine geschlossene Vorgehensweise zur Ermittlung von Beanspruchungen von Brückenbauwerken infolge Straßenverkehr entwickelt, erprobt und verifiziert (vgl. [4], [5], [1], [6]). Die Ermittlung von künstlichen Messdaten erfolgt unter Anwendung dieser Vorgehensweise bis zur Ermittlung von Beanspruchungs-Zeit-Verläufen. Die in vorhergehenden Untersuchungen durchgeführten statistischen Auswertungen und Extrapolationen der berechneten Zeitverläufe hin zu charakteristischen Werten von Beanspruchungen sind nicht Gegenstand der hier vorliegenden Untersuchungen. In der angewandten Methodik werden unter Verwendung von erforderlichen Eingangsdaten (Beschreibung des Verkehrsaufkommens hinsichtlich Verkehrsstärke, Verkehrszusammensetzung und Gesamtgewichten der verkehrenden Fahrzeuge) Verkehrssimulationsrechnungen durchgeführt. Die simulierten Fahrzeugfolgen in zu betrachtenden Fahrspuren werden rechnerisch über Einflussflächen definierter Kennwerte von Tragsystemen geführt und daraus Kennwert-Zeit-Verläufe ermittelt.

Die Beschreibung des Straßenverkehrs erfolgt im Rahmen der Untersuchungsmethodik im Wesentlichen durch folgende Kennwerte:

- 1) Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV)
- 2) Durchschnittliche tägliche Schwerverkehrsstärke (DTV-SV)
- 3) Schwerverkehrszusammensetzung
- 4) Gesamtgewichtsverteilungen für ausgewählte Fahrzeugtypen des Schwerverkehrs
- 5) Bei mehr als einer Spur pro Fahrtrichtung: Verteilung des Verkehrsaufkommens auf die Spuren einer Fahrtrichtung
- 6) Anteil und Art von genehmigungspflichtigem Schwerverkehr für den im Allgemeinen eine Dauergenehmigung erteilt wird
- 7) Verteilung des Verkehrsaufkommens über den Tag
- 8) Stauhäufigkeit

Die Simulationsrechnungen erfolgen zunächst getrennt für einzelne Fahrstreifen. Der Ablauf der eigentlichen Simulationsrechnung für die Erzeugung einer Fahrzeugfolge in einer Spur ist in nachfolgender Abbildung 12 dargestellt.

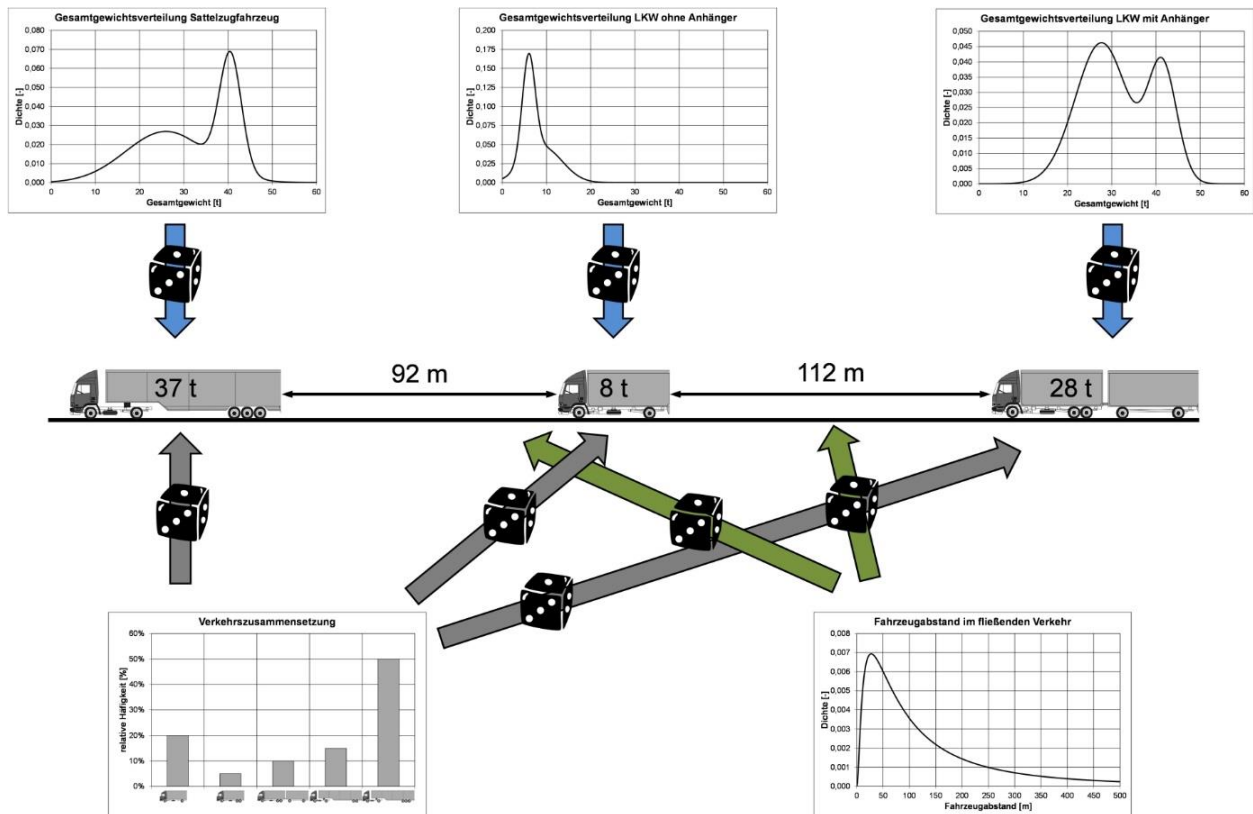


Abbildung 12: Simulationsvorgang zur Erzeugung einer Fahrzeugfolge in einer Fahrspur

3.1.2. Angewandete Vorgehensweise

In den vorliegenden Untersuchungen wird die beschriebene Methodik in einer modifizierten Form angewendet. Charakteristisch für das reale Verkehrsaufkommen über einen definierten Zeitraum ist die Änderung der Fahrzeuganzahl pro Zeiteinheit. In Auswertungen von Verkehrserfassungsdaten werden diese Charakteristiken durch Tages-, Wochen- und Jahressganglinien dargestellt. Des Weiteren kann sich die Zusammensetzung des Verkehrs zum Beispiel in Abhängigkeit des Wochentages ändern.

Die Fahrzeuganzahl pro Zeiteinheit wird in der im vorhergehenden Absatz beschriebenen Methodik durch eine Anpassung der Verteilungsfunktion der Fahrzeugabstände abgebildet. Die Verkehrszusammensetzung ist ebenfalls wie erläutert Eingangsparemeter für die Simulationsrechnung. Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist die realitätsnahe Abbildung des Verkehrs einschließlich der genannten Charakteristik. Zur Umsetzung dieser Anforderung wurden Daten aus der Verkehrserfassung an der bereits hinsichtlich des Tragwerkes betrachteten Brücke (vgl. Absatz 2) verwendet.

Hinsichtlich der Fahrzeuganzahl pro Zeiteinheit wurden dabei Abschnitte von 3 Stunden betrachtet. Hinsichtlich der Verkehrszusammensetzung wurden zunächst Werte getrennt für die einzelnen Wochentage ermittelt. Dabei zeigte sich, dass eine sinnvolle Differenzierung zwischen den Wochentagen Montag, Dienstag bis Freitag, Samstag und Sonntag möglich ist.

Für einen Ansatz, der Modifikationsmöglichkeiten zulässt, wurden eine Vielzahl von Simulationsrechnungen durchgeführt, in denen eine breite Palette von Schwerverkehrsstärken pro 3 Stunden und Verkehrszusammensetzungen berücksichtigt wurde. Dabei wurden pro Variante (SV-Stärke und Zusammensetzung) mehrere Tage Verkehr simuliert. Im weiteren Verlauf wurden damit unter Verwendung der erzeugten Einflussflächen (vgl. Absatz 0) entsprechend lange Kennwert-Zeit-Verläufe erzeugt und diese in „Blöcke“ zu je 3 Stunden

aufgeteilt. Die so erzeugten Datenbestände dienen dann als Grundlage für die Zusammenstellung der finalen Kennwert-Zeit-Verläufe unter Berücksichtigung der realen Verkehrscharakteristik.

Im nachfolgenden Absatz werden die ermittelte Datengrundlage sowie die daraus gewählte Untermenge zur Erzeugung der künstlichen Messdaten zusammengestellt.

3.2. Datengrundlage aus Referenzobjekt

In nachfolgender Tabelle 1 und Tabelle 2 sind die aus der Auswertung der vorliegenden Verkehrserfassungsdaten ermittelten Parameter der Verkehrszusammensetzung aufgeführt. Die Variation der Fahrzeugtypen wurde dabei auf die Auswahl von 7 häufig vorkommenden Typen reduziert.

Tabelle 1: Schwerverkehrszusammensetzung – aus Verkehrsdaten AK Nürnberg – Spur 1

Fahrzeugtyp	Montag	Dienstag bis Freitag	Samstag	Sonntag
8	9,820%	6,600%	5,300%	19,340%
9	2,980%	2,000%	1,600%	5,860%
34	8,290%	7,830%	6,060%	5,280%
41	9,910%	9,370%	7,240%	6,320%
96	2,960%	3,190%	3,430%	2,710%
97	16,320%	17,550%	18,870%	14,950%
98	49,720%	53,460%	57,500%	45,540%

Tabelle 2: Schwerverkehrszusammensetzung – aus Verkehrsdaten AK Nürnberg – Spur 2

Fahrzeugtyp	Montag	Dienstag bis Freitag	Samstag	Sonntag
8	11,440%	7,670%	7,670%	19,720%
9	3,470%	2,330%	2,330%	5,980%
34	11,560%	11,200%	10,110%	10,520%
41	13,840%	13,400%	12,090%	12,580%
96	2,560%	2,810%	2,910%	2,200%
97	14,120%	15,470%	16,030%	12,110%
98	43,010%	47,120%	48,860%	36,890%

In nachfolgender Abbildung 13 sind die aus den vorliegenden Verkehrserfassungsdaten ermittelten Fahrzeugzahlen pro 3 Stunden über den betrachteten Auswertungszeitraum zusammengestellt. Aus diesem Gesamtdatenbestand wurden für die Erzeugung der künstlichen Messdaten Teilbereiche (Wochenweise) verwendet. Zur Dokumentation der verwendeten Untermenge wird auf Absatz 6 verwiesen.

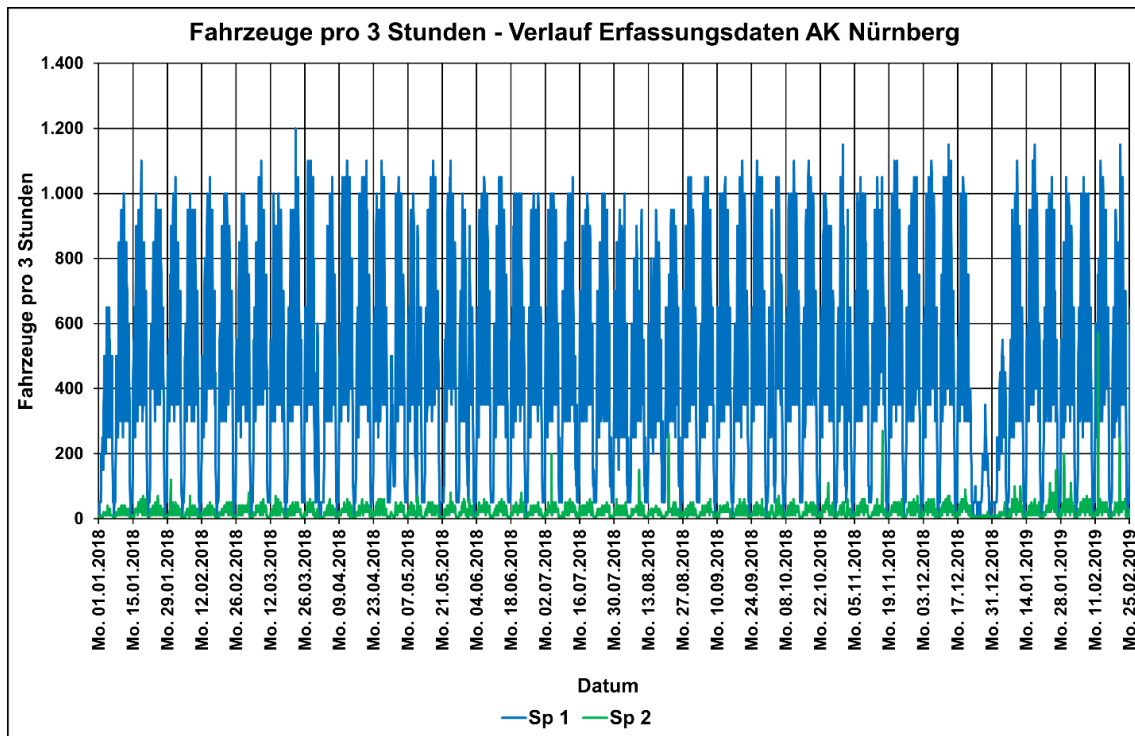


Abbildung 13: Fahrzeuganzahl pro 3 Stunden, Brücke AK Nürnberg, Januar 2018 bis Februar 2019 - Basisdaten

3.3. Weitere Datengrundlagen

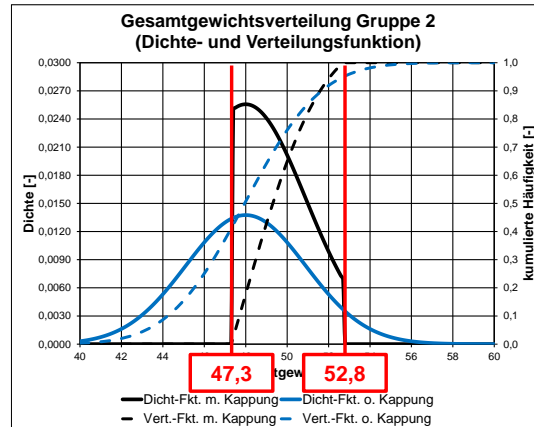
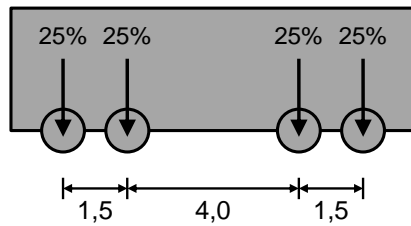
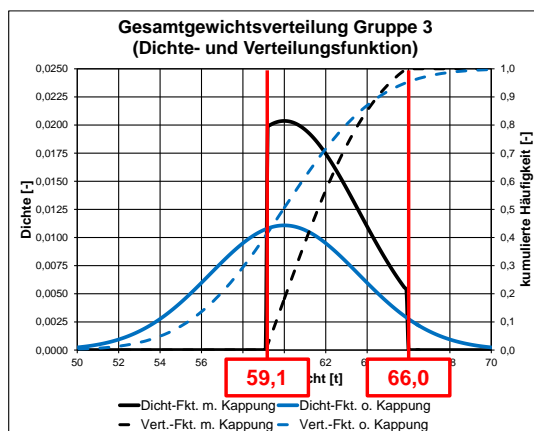
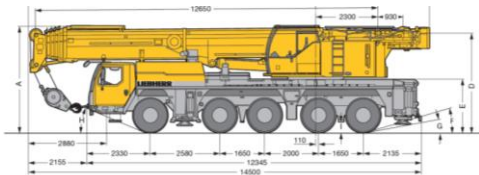
3.3.1. Abbildung von genehmigungspflichtigem Schwerverkehr

Im Zuge der Erzeugung von künstlichen Messdaten wurden Abschnitte generiert, in denen die Verkehrszusammensetzung einen Anteil von 1 % von genehmigungspflichtigen Fahrzeugen enthält, für die typischer Weise Dauergenehmigungen erteilt werden. Diese bewegen sich demnach dann im „normalen“ Schwerverkehr mit.

Die Abbildung dieses genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs erfolgt durch das Einmischen von zwei definierten Ersatzfahrzeugen in den normalen Schwerverkehr. Die Verwendung von Ersatzfahrzeugen ist aufgrund des möglichen breiten Spektrums von realen Fahrzeugen des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs erforderlich. Die Ersatzfahrzeuge bilden zwei Fahrzeuggruppen ab:

- Gruppe 1: Fahrzeuge mit 48 t Gesamtgewicht
(Mobilkrane und Betonpumpenfahrzeuge)
- Gruppe 2: Fahrzeuge mit 60 t Gesamtgewicht
(Mobilkrane)

Es wird angenommen, dass sich die beiden Gruppen im Verhältnis 70% zu 30% aufteilen. In den beiden nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 14 und Abbildung 15) sind die Geometrien, Achslastverteilungen und Gesamtgewichtsverteilungen der betrachteten Ersatzfahrzeuge dargestellt. Für die Gesamtgewichtsverteilungen wurden gekappte Funktionen verwendet. Hintergrund hierzu ist die Überlegung, dass Fahrzeuge zwar mit von den Genehmigungsbeantragungen abweichenden Gewichten verkehren, die Überladungsmöglichkeiten rein technisch bedingt nicht in dem Umfang vorhanden sind, wie es bei den Fahrzeugen des normalen LKW-Verkehrs möglich ist. Zur Dokumentation der erzeugten Abschnitte mit Ansatz dieser Fahrzeuge wird auf Absatz 6 verwiesen.

**Ersatzfahrzeug Gruppe 1
(48 t GG)****Abbildung 14:** Geometrie, Achslastverteilung und Gesamtwichtsverteilung – Ersatzfahrzeug 1**Ersatzfahrzeug Gruppe 2
(60 t GG)****Abbildung 15:** Geometrie, Achslastverteilung und Gesamtwichtsverteilung – Ersatzfahrzeug 2

3.3.2. Abbildung von Stauverkehr

Im Zuge der Erzeugung von künstlichen Messdaten wurden Abschnitte generiert, in denen der Abstand zwischen den Fahrzeugen sehr gering ist und die Fahrzeuggeschwindigkeit 5 km/h beträgt. Hierdurch werden Stausituationen abgebildet. Der Abstand zwischen den Fahrzeugen wurde als gleichverteilt zwischen 5 m und 15 m bzw. zwischen 5 m und 25 m angenommen. Zur Dokumentation der erzeugten Abschnitte mit Stauverkehr wird auf Absatz 6 verwiesen.

3.3.3. Parameter für die Fahrzeuge

Zur Simulation der Fahrzeuge sind Angaben zur Gesamtwichtsverteilung, der Achskonfiguration (Achszahl und Achsabstände) sowie zur Verteilung des Gesamtgewichtes auf die Achsen erforderlich. Hinsichtlich der Gesamtwichtsverteilung wurde auf vorliegende Datenbestände aus vorhergehenden Untersuchungen zurückgegriffen. Die Achsabstände wurden aus den Verkehrserfassungsdaten des betrachteten Bauwerkes ermittelt. Hinsichtlich der Verteilung des Gesamtgewichtes auf die Achsen wurde, abweichend von vorhergehenden Untersuchungen, eine Abhängigkeit der Verteilungswerte zum Gesamtgewicht berücksichtigt. Diese Daten wurden ebenfalls aus den Verkehrserfassungsdaten des betrachteten Bauwerkes ermittelt. Für die Dokumentation der verwendeten Parameter wird auf Absatz 6 verwiesen.

4. Temperatureinwirkungen

4.1. Vorbemerkungen

Temperatureinwirkungen auf Tragwerke oder Bauteile sind solche Einwirkungen, die sich aus Änderungen der Temperaturverteilung innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls ergeben. Bei Massivbrücken ist das die Änderung der Temperaturfelder im Bauwerk pro Zeiteinheit.

Entsprechend der Leistungsbeschreibung ist die Temperatureinwirkung auf Basis realer Klimadaten unter Berücksichtigung von täglichen und saisonalen Schwankungen anzusetzen. Es ist zu prüfen welche Anteile der Temperatureinwirkung (konstant, veränderlich, nichtlinear) das globale Verhalten des Bauwerks beeinflussen und infolge zu berücksichtigen sind. Die Ergebnisse sind anhand realer Messdaten aus der Literatur oder aus eigenen Datenbeständen einer Plausibilitätskontrolle zu unterziehen.

Für die Untersuchungen wurde entsprechend Abschnitt 2 das Bauwerk 402e im Bereich des Autobahnkreuzes Nürnberg, Richtungsfahrbahn Regensburg als Referenzbauwerk ausgewählt.

Am Bauwerk werden Klimadaten, punktuell Temperaturen im Brückenquerschnitt und ebenso punktuell Oberflächentemperaturen erfasst.

Alle Kennwerte der Sensoren (Dehnungen und Verschiebungen) beinhalten die Summe der Einwirkungen, die nach der Installation auftreten. Demzufolge auch der Temperaturen. Nähere Erläuterungen hierzu werden im Abschnitt Temperaturbeanspruchungen ausgeführt.

Die Datengrundlage aus gemessenen Werten am Bauwerk genügt nicht, um daraus reale Temperatureinwirkungen abzuleiten. Deshalb werden diese unter Nutzung der verfügbaren Daten rechnerisch ermittelt.

Die rechnerische Ermittlung der Temperaturbeanspruchung von Brücken ist eine komplexe Aufgabe, deren Lösungsweg mehrere Teilschritte enthält und in Abbildung 16 dargestellt ist.

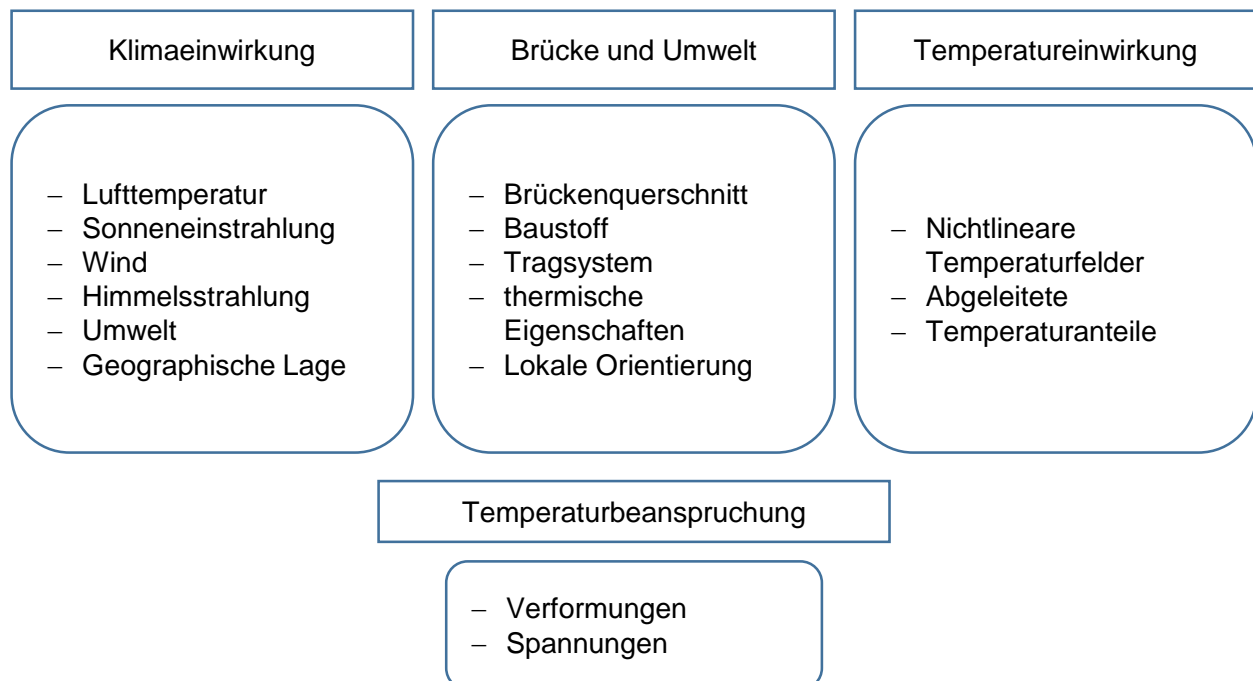


Abbildung 16: Von der Klimaeinwirkung zur Temperaturbeanspruchung

4.2. Ermittlung der Klimaeinwirkungen

4.2.1. Einführung

Unter Klimaeinwirkungen wird die Wärmeenergiebilanz eines im Freien stehenden Baukörpers ohne eigene Energiequellen, die durch die Einflüsse der Atmosphäre, der Sonne und der terrestrischen Umgebung des Körpers bestimmt wird, verstanden.

Die Wärmeaufnahme-abgabe an der Körperoberfläche beinhaltet:

- Wärmeaustausch zwischen Bauwerk und Atmosphäre durch Konvektion
- Wärmestrahlung aus Atmosphäre und der terrestrischen Umgebung

Bei der Bestimmung der Wärmeaufnahme-abgabe sind folgende Einflüsse zu beachten:

- Sonnenstrahlung
- Lufttemperatur
- Wind
- Strahlung in die Umgebung und aus der Umgebung

In Abbildung 17 sind die klimatischen Einflüsse auf die ausgewählte Brücke dargestellt.

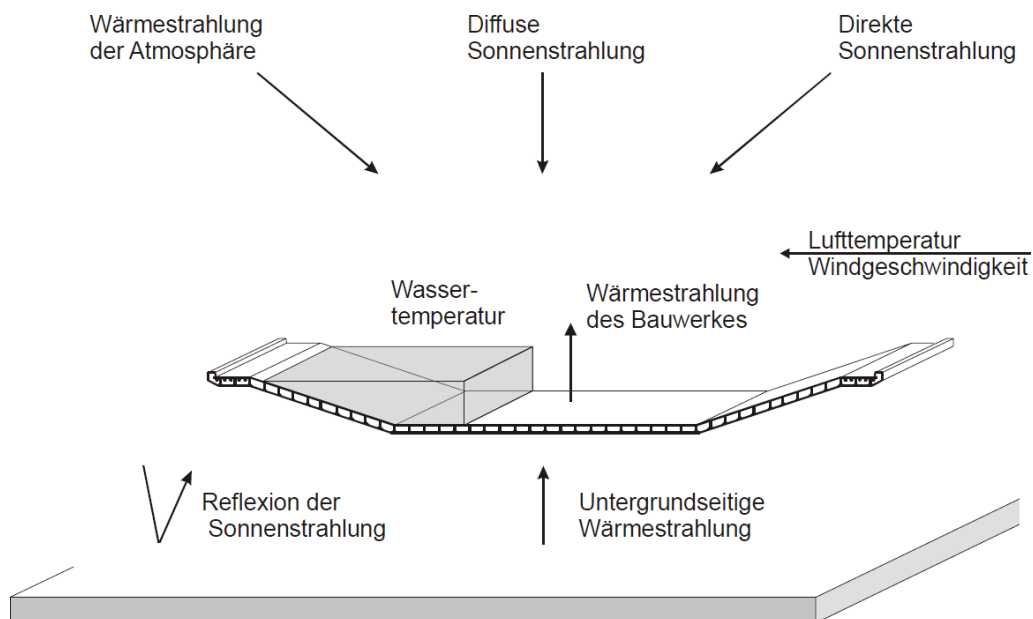


Abbildung 17: Klimaeinflüsse auf eine Brücke (Darstellung aus [9])

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die Ermittlung der Klimaeinwirkungen gegeben. Detaillierte Ausführungen einschließlich eines nachvollziehbaren Arbeitsablauf ist der auf dem Datenträger enthaltenden Arbeit zu entnehmen (vgl. Erläuterungen in Absatz 6).

4.2.2. Die ideale Außenlufttemperatur

Zur Erfassung der Wärmeenergiebilanz wird das Konzept der idealen Außenlufttemperatur ϑ_{ai} benutzt. Die ideale Außenlufttemperatur ist keine reale Bauwerksoberflächentemperatur, sondern sie widerspiegelt die Energiebilanz unmittelbar vor der Bauwerksoberfläche.

Die Wärmestromdichte an einer Oberfläche ergibt sich aus der Zusammenfassung von konvektive Wärmestrom und der Strahlungswärmestrom.

$$Q_{Gk} = Q_{\text{Konvektion}} + Q_{\text{Strahlung}} \quad (1)$$

Mit der idealen Außenlufttemperatur ϑ_{ai} und einer Gesamtwärmeübergangszahl kann der gesamte Wärmestrom numerisch als Konvektionswärmeaustausch bestimmt werden.

$$Q_{Gk} = \alpha_o \cdot (\vartheta_{id} - \vartheta_o) \quad (2)$$

$$\text{mit: } \alpha_o = \alpha_K(\vartheta_R, \vartheta_a, \nu) + \alpha_S(\vartheta_R, \vartheta_a)$$

Wobei α_o der summarische Wärmeübergangskoeffizient ist

Die Bildung der Wärmebilanz an der Bauteilfläche erfolgt durch die folgende Gleichung:

$$Q_{Gk} = Q_K - Q_{SK} + Q_{SL} \quad (3)$$

Q_{SK} und Q_{SL} sind die Wärmestromdichte infolge kurzwelliger Strahlung bzw. infolge langwelligem Strahlungsaustausch.

Die ideale Außenlufttemperatur bestimmt sich durch die Gleichsetzung der beiden letzten Gleichungen.

$$\vartheta_{id} = \vartheta_a + \frac{Q_{SK}}{\alpha_o} - \frac{Q_{SL}}{\alpha_o} = \vartheta_a + \vartheta_{SK} - \vartheta_{SL} \quad (4)$$

ϑ_{SK} und ϑ_{SL} sind die Temperaturanteile aus kurz- bzw. langwelliger Strahlung

4.2.3. Die ideale Außenlufttemperatur für das Bauwerk 402e im Bereich des Autobahnkreuzes Nürnberg

4.2.3.1. Meteorologische Größen für das Jahr 2018

Zur Bestimmung der idealen Außenlufttemperatur sind meteorologische Randbedingungen erforderlich. Diese sind:

Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit

Die Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit werden von der nahegelegenen Wetterstation Nürnberg-Flughafen bezogen.

Abbildung 18 veranschaulicht den stündlichen Außenlufttemperaturverlauf aus der Wetterstation für das Jahr 2018.

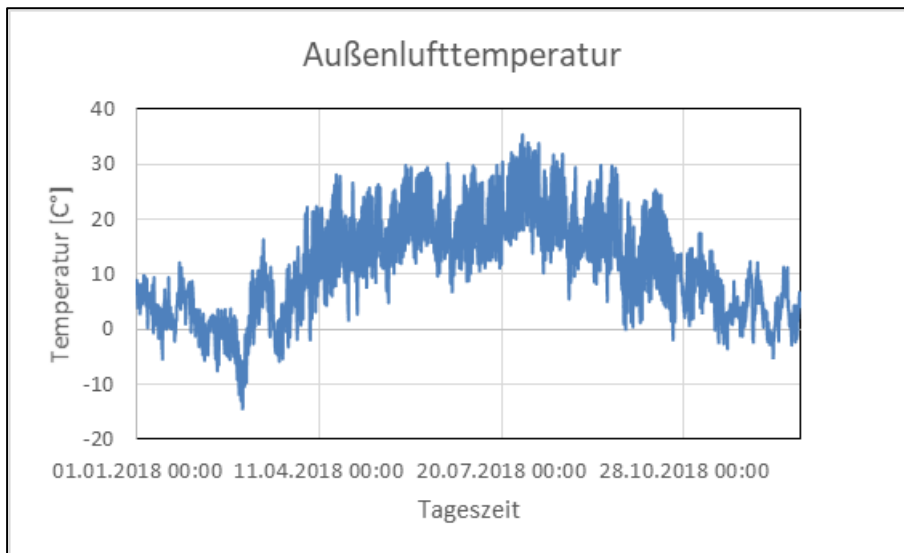


Abbildung 18: Stündliche Außenlufttemperatur für das Jahr 2018 (Daten aus [11])

Die Außenlufttemperatur und Windgeschwindigkeit wird auch an der Brücke durch eine Wetterstation vor Ort gemessen und diese in der Abbildung 19 dargestellt. Ein Quervergleich der Außenlufttemperatur der Stationen Flughafen und lokal vor Ort ist in Abbildung 20 zu sehen.



Abbildung 19: Wetterstation vor Ort (vgl. [7])

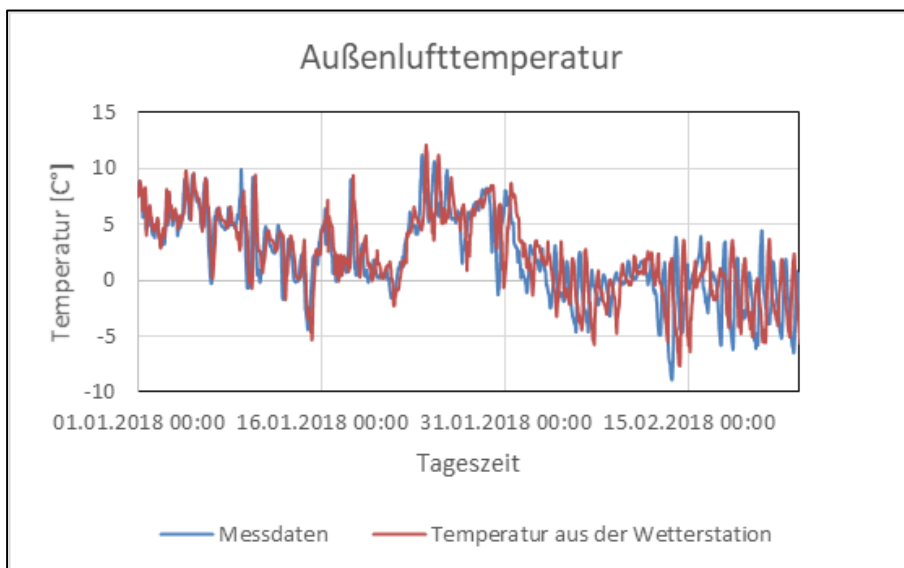


Abbildung 20: Vergleich der Außenlufttemperatur zwischen Wetterstation und gemessenen Daten

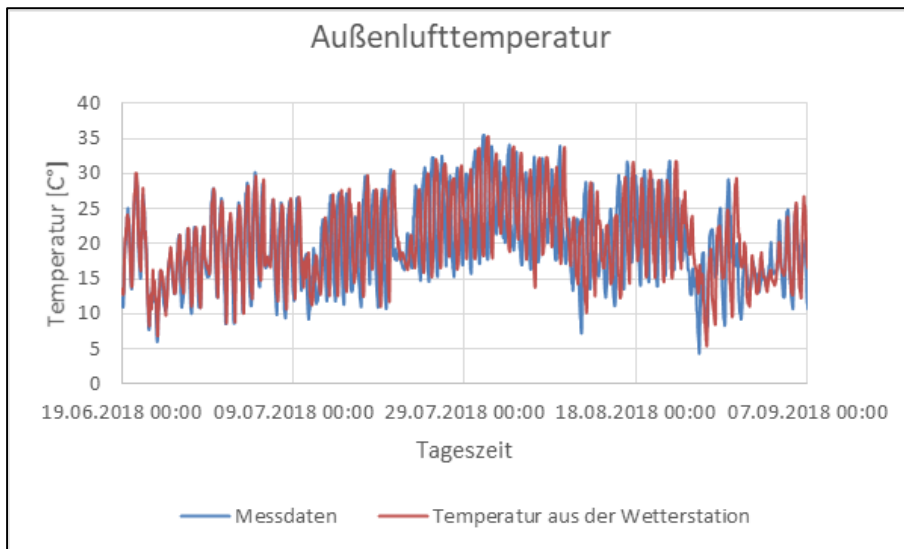


Abbildung 21: Vergleich der Außenlufttemperatur zwischen Wetterstationsdaten und gemessenen Daten von 19.06.2018 bis 08.09.2018

Der Verlauf der Außenlufttemperaturen ist deckungsgleich, jedoch die absoluten Temperaturen sind vor Ort etwas größer. Diese Tendenz entspricht den unterschiedlichen Messhöhen (Wetterstation 2m über Erdboden).

4.2.3.2. Thermophysikalische Kenngrößen

Die Emissionskoeffizienten bestimmen neben den Wärmeübergangskoeffizienten die Wärmeaufnahme bzw. Wärmeabgabe des Querschnitts an die Umgebung. Der Wärmetransport innerhalb des Querschnitts wird von der Wärmeleitfähigkeit, der Wärmekapazität und der Dichte beeinflusst.

Die kurzwellige Strahlung besteht aus der direkten Sonnenstrahlung, der diffusen Sonnenstrahlung und der Reflexionsstrahlung.

Für die Reflexion der Globalstrahlung der Sonne auf die terrestrische Umgebung wird die Reflexionszahl r_u gleich 0,4 für Beton und gleich 0,1 für Asphalt angenommen.

Die Berechnung wird für die reale Geometrie und Lage der Brücke geführt, die Stege haben in Südrichtung eine Neigung von 62° und in Nordrichtung von 54° .

Die Brücke ist in der Richtung Südost gerichtet und hat folgende Azimutwinkel in Abhängigkeit von Südrichtung ($\gamma=0$):

Tabelle 3: Azimutwinkel der Brücke 402e am AK Nürnberg

Orientierung	N	E	S	W
α	$-152,5^\circ$	$-62,5^\circ$	$27,5^\circ$	$117,5^\circ$

4.2.3.3. Ergebnisbeispiel direkte Strahlung

Die direkte Sonnenstrahlung ist eine gerichtete Strahlungskomponente. Die Strahlungsintensität hängt von der Intensität der eintreffenden Strahlung und von der Orientierung der Fläche ab.

Die direkte Sonnenstrahlung auf eine Bauteiloberfläche entfällt, wenn die Bauwerksumgebung eine verschattende Wirkung ausüben kann.

Dies trifft bei Brücken durch die Verschattung des Kragarmes immer zu.

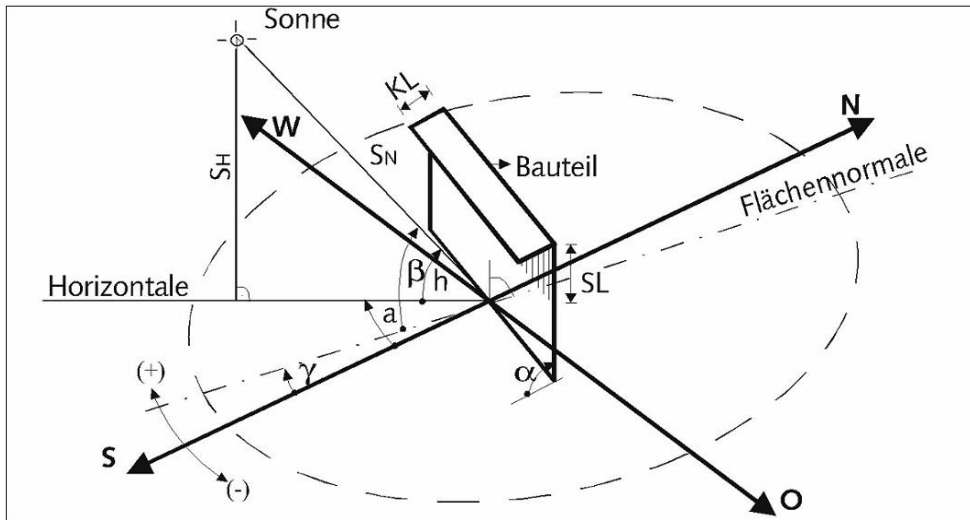


Abbildung 22: Winkel zur Bestimmung der Globalstrahlung auf einer Wand (vgl. [10])

Die maximale direkte Strahlung wird im Winter auf die vertikale Fläche Süd-Ost-Richtung größer als auf die horizontale Fläche, die wiederum im Sommer die maximale Strahlung erhält. Ursache ist die Sonnenhöhe, die im Sommer größer ist. Abbildung 23 und Abbildung 24 dokumentieren diesen Sachverhalt.

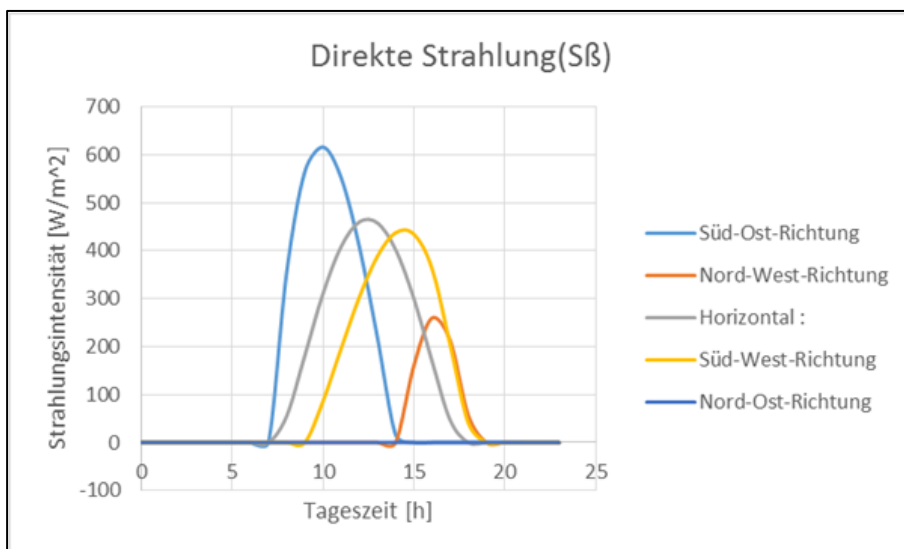


Abbildung 23: Direkte Strahlung auf Brücke 402e Nürnberg am kältesten Tag (28.02.2018)

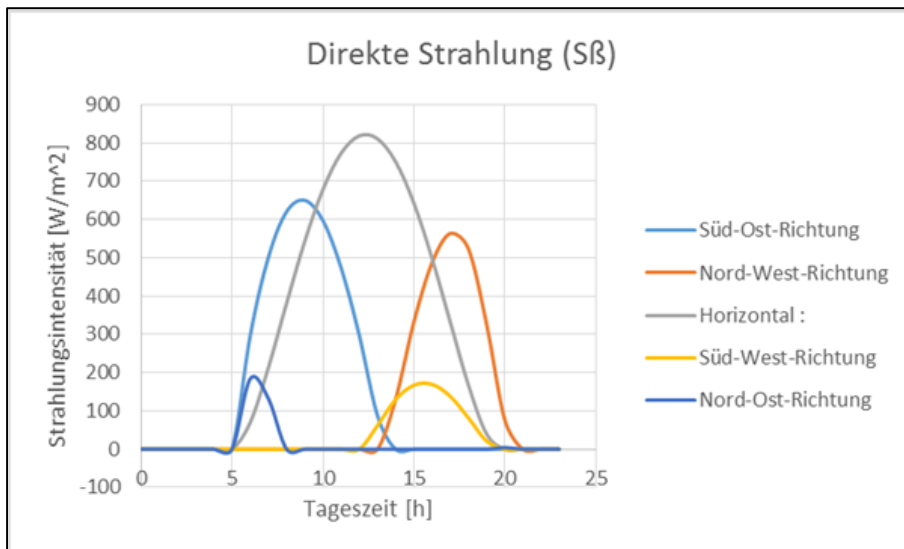


Abbildung 24: Direkte Strahlung auf die Brücke 402e Nürnberg am wärmsten Tag (31.07.2018)

Die Stromdichte auf die Bauteiloberfläche entsteht aus direkter $Q_{Sk}=f(S_{\beta}, H_{\alpha}, R_{\alpha})$ und indirekter $Q_{Sk}=f(H_{\alpha}, R_{\alpha})$ Sonneneinstrahlung, während die Stromdichte im Schatten aus indirekter Sonneneinstrahlung entsteht.

4.2.3.4. Ergebnisse ideale Außenlufttemperatur der Brücke 402 e

Der Verlauf der ideellen Außenlufttemperatur ist für das Jahr 2018 am kältesten Tag (28.02.2018, Abbildung 25) und wärmsten Tag (31.07.2018, Abbildung 26) dargestellt.

Die Berechnung wird für wolkenlosen Himmel ohne Berücksichtigung der Bewölkungsgrad geführt.

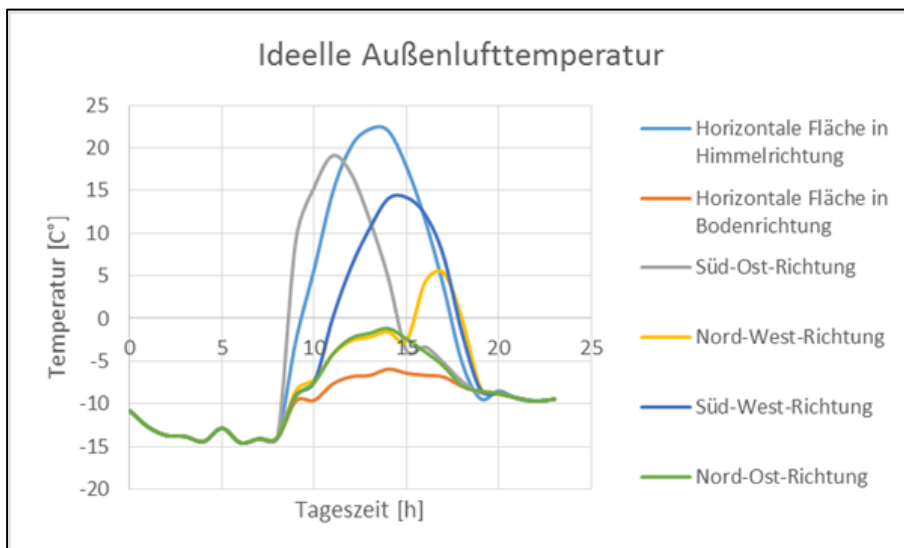


Abbildung 25: Ideale Außenlufttemperatur für die Brücke 402e Nürnberg am kältesten Tag (28.02.2018)

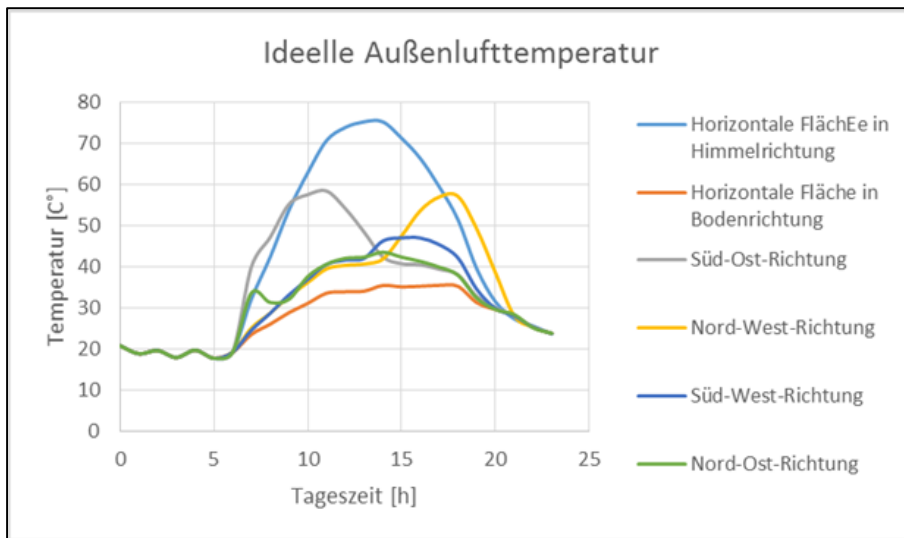


Abbildung 26: Ideelle Außenlufttemperatur für die Brücke 402e Nürnberg am wärmsten Tag (31.07.2018)

4.2.4. Innenlufttemperaturen des Hohlkastens

Die Innenlufttemperatur ist eine spezifische Lufttemperatur, die von der Außenlufttemperatur abweicht. Der konvektive Wärmeübergang findet über die Luft im Kasteninneren statt, welche durch die umhüllenden Oberflächen temperiert wird.

Nach [7] wird für die Berechnung der Lufttemperatur in Hohlkästen ein Berechnungsmodell vorgestellt, das von einer ausgeglichenen Lufttemperatur ausgeht.

Es wird angenommen, dass die Strömungsgeschwindigkeit der Luft gegen Null geht. Deshalb wird ein konvektiver Wärmeübergang als Wärmeübergangskoeffizient berechnet.

Der Wärmestrom im Hohlkasten ist der Wärmeaustausch zwischen den einzelnen Teilflächen und der Lufttemperatur im Hohlkasten. Die Summe der einzelnen Wärmeströme an allen Teilflächen ergibt der gesamte Wärmestrom Q_L .

Es wird für das Zeitintervall Δt die mittleren Oberflächentemperaturverhältnisse ϑ_R im Hohlkasten angenommen.

$$Q_L = \int_A \alpha_K \cdot (\vartheta_R - \vartheta_{\text{innen}}) \cdot dA \quad (5)$$

$$\Delta\vartheta_{\text{innen}} = \frac{\Delta t}{\rho_L \cdot (c_L \cdot V_L)} \cdot Q_L \quad (6)$$

Wobei ρ_L die Rohdichte der Luft im inneren des Kastenträgers ist. Sie hängt von Luftdruck und Lufttemperatur ab und wird mit $1,25 \text{ kg/m}^3$ angenommen.

c_L ist die spezifische Wärmekapazität der Luft ($1000 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}$ angenommen)

V_L ist das Luftvolumen.

Zur Vereinfachung wird bei der Berechnung der Temperaturfelder angenommen, dass die Innenlufttemperatur gleich der Außenlufttemperatur im Schatten ist.

4.3. Ermittlung von Temperaturverteilungen in Bauwerken

4.3.1. Die Fouriersche Differentialgleichung

Ein Körper, der mit anderen Körpern in thermischem Kontakt steht, bestrebt sich seine Temperatur auszugleichen. Demzufolge findet eine Wärmeströmung statt. Die Wärme wird ausschließlich in dem festen Körper durch Leitung übertragen, so kann in homogenen isotropen Körpern die Wärmeströmung zu einem Zeitpunkt t beschrieben werden.

Im rechtwinkligen Koordinatensystem findet das Temperaturfeld seine rechnerische Darstellung durch:

$$\vartheta = f(x, y, z, t) \quad (7)$$

mit: x, y, z als Raumkoordinaten
 t als Zeit
 ϑ Temperatur

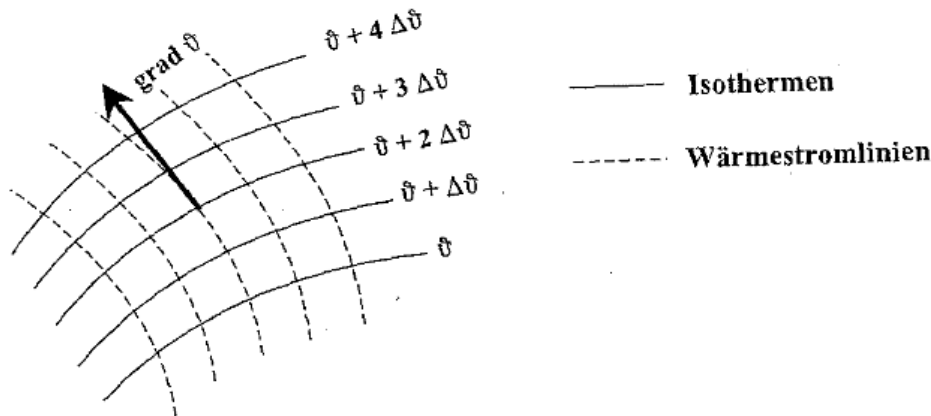


Abbildung 27: Temperaturfeld, Temperaturgradient, Wärmestromlinie (vgl. [3])

In einem Temperaturfeld gibt es zu jedem Punkt in bestimmten Richtungen weiter benachbarte Punkte, die dieselbe Temperatur besitzen. Benachbarte Punkte gleicher Temperatur des Temperaturfeldes lassen sich zu Isothermen verbinden.

In jedem Punkt der Isotherme gibt es eine ausgezeichnete Richtung, die die Temperaturänderung darstellt. Sie ist durch den kürzesten Abstand zur benachbarten Isotherme gegeben.

Diese Temperaturänderung wird durch einen Vektor beschrieben, der sich aus Ableitung des Temperaturfeldes in Richtung der Normalen ergibt. In den kartesischen Koordinaten wird den Vektor wie folgt beschrieben:

$$\text{grad } \vartheta = i_1 \frac{d\vartheta}{dx} + i_2 \frac{d\vartheta}{dy} + i_3 \frac{d\vartheta}{dz} \quad (8)$$

mit: i_1, i_2, i_3 als Stoffwerte

Dieser Vektor wird positiv angenommen, wenn er in Richtung ansteigender Temperatur zeigt. Analog zum Temperaturfeld wird der Vektor $\text{grad } \vartheta$ als Temperaturgradient bezeichnet.

Da die Wärme von höherer Temperatur zu niedrigerer Temperaturstelle strömt, kann konform zu den Gradienten ein zusätzliches Vektorfeld definiert werden, das den Wärmefluss in einem Körper beschreibt.

$$q = -\lambda \text{ grad}\vartheta \quad (9)$$

Hierin ist der Proportionalitätsfaktor λ die Wärmeleitfähigkeit des Materials des Körpers [W/(m.K)], die sich mit Druck und Temperatur verändert.

Unter Verwendung der Gleichung (8) und (9) wird die Komponente des Vektors q in Richtung der einzelnen Koordinatenachsen wie folgt beschrieben:

$$q_x = -\lambda_x \frac{d\vartheta}{dx}; \quad q_y = -\lambda_y \frac{d\vartheta}{dy}; \quad q_z = -\lambda_z \frac{d\vartheta}{dz}, \quad (10)$$

wobei q_x , q_y und q_z den Wärmefluss durch 1 m² [W/m²] und λ_x , λ_y und λ_z die zugehörigen Wärmeleitfähigkeiten [W/(m.K)] darstellen.

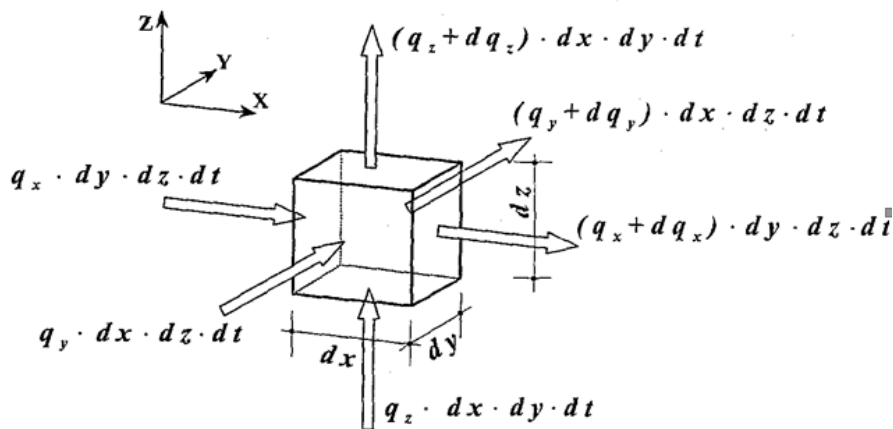


Abbildung 28: Wärmeströme am Volumenelement (vgl. [3])

Die Bestimmung der Veränderung des Temperaturfeldes in der Zeiteinheit folgt aus der Wärmebilanz der Wärmeströme am Volumenelement.

Die zur Temperaturänderung im Volumenelement benötigte Wärmemenge wird aus dem Speichervermögen abgeleitet. Wird mit ρ die Dichte des Körpers und c seine spezifische Wärmekapazität bezeichnet, so ergibt sich die gespeicherte Wärmemenge:

$$dQ_2 = c\rho dVdt \quad (11)$$

Nach Abbildung 28 und der Gleichung (10) ergibt sich der Wärmeaustausch mit den benachbarten Volumina:

$$dQ_3 = \lambda \left(\frac{d^2\vartheta}{dx^2} + \frac{d^2\vartheta}{dy^2} + \frac{d^2\vartheta}{dz^2} \right) \quad (12)$$

wobei λ die Wärmeleitfähigkeit ist.

Auf der Grundlage des Energiehaltungssatzes muss $dQ_2 = dQ_3$ sein. Diese Bedingung führt zur Fourierschen Differentialgleichung der Wärmeleitung:

$$\lambda \left(\frac{d^2 \vartheta}{dx^2} + \frac{d^2 \vartheta}{dy^2} + \frac{d^2 \vartheta}{dz^2} \right) = c \rho d V dt. \quad (13)$$

Es ist eine partielle, lineare Differentialgleichung 2. Ordnung, die orts- und zeitabhängige Temperaturfelder unter Berücksichtigung der Stoffbeschaffenheit kennzeichnet.

Zur Lösung der Fourierschen Differentialgleichung für einen Brückenquerschnitt sind räumliche und zeitliche Anfangs- und Randbedingungen zu erfüllen. Die zeitliche werden Anfangsbedingungen durch die Vorgabe des Temperaturfeldes zum Zeitpunkt $t = 0$ festgelegt.

Die Wärme wird im Bauwerk durch Leitung übertragen und an der Grenzschicht zwischen dem Bauwerk und der Umgebung findet einen Wärmeaustausch durch Konvektion und Strahlung statt. Die örtlichen Randbedingungen sind nach drei Arten von Randbedingungen zu unterscheiden:

- Die erste Art der Randbedingung: Dabei wird die Temperatur für jeden Punkt an der Oberfläche als Funktion des Ortes und der Zeit vorgegeben.
- Die zweite Art der Randbedingung: Dabei wird der Wärmestrom durch die Oberfläche als Funktion vorgegeben.
- Die dritte Art der Randbedingung: hierin wird der Wärmeaustausch zwischen der Oberfläche des Bauteils und der Umgebung über ein physikalisches Gesetz beschrieben.

Die Bestimmung die Wärmeübertragung in der Randbedingung 3 von strömenden zu festen Körpern wird mit dem Newtonschen Abkühlungsgesetz beschrieben. Mit Hilfe eines Gesamtwärmeübergangskoeffizienten ergibt sich die Wärmestromdichte an der Oberfläche des festen Körpers mit der Gleichung

$$q = \alpha(\vartheta_R - \vartheta_{id}) \quad (14)$$

mit: α *Wärmeübergangszahl*
 ϑ_R *Oberflächentemperatur*
 ϑ_{id} *ideelle Außenlufttemperatur*

Die an der Körperoberfläche abgegebene bzw. zugeführte Wärmestromdichte entspricht dem vom Körper durch Wärmeleitung über die Begrenzungsflächen zu- bzw. abfließenden Wärmestrome

$$q = -\lambda \text{ grad} \vartheta \quad (15)$$

Durch Gleichsetzen der Beiden Gleichungen (0.11) und (0.12) ergibt sich der Temperaturgradient an der Körperoberfläche zu:

$$(\text{grad} \vartheta)_{Rand} = -\frac{\alpha}{\lambda} (\vartheta_R - \vartheta_{id}) \quad (16)$$

mit: $\frac{\alpha}{\lambda}$ *relative Wärmeübergangszahl*

Die Wärmekapazität, die Wärmeleitfähigkeit und die Dichte beschreiben die Materialeigenschaften. Das Vermögen von Baumaterialien, Wärme zu Speichern wird durch die Wärmekapazität beziffert. Aus dem Produkt mit der Materialdichte ρ ergibt sich das Energiespeichervermögen des Werkstoffes

Eine mathematische Lösung der Fourierschen Differentialgleichung der Wärmeleitung ist die numerische Lösungsmethode. Sie zeigen gegenüber den analytischen Lösungsverfahren eine ausreichende Genauigkeit.

Für praktische Aufgabestellungen, welche komplizierte Geometrien und/oder Randbedingungen beinhalten, werden numerische Methoden normalerweise bevorzugt. Zu den numerischen Verfahren, zur Bestimmung stationärer und instationärer Temperaturfelder zählen unter anderem das Differenzenverfahren, das Bilanzverfahren und die Methode der Finiten Elemente.

Im Weiteren wird zur Berechnung der Temperaturfelder in Brückenquerschnitten die Methode der Finiten Elemente und die Anwendung durch InfoGraph gewählt.

4.3.2. Ermittlung der Temperaturfelder für die Brücke 402 e

Es werden die Temperaturfelder der Brücke 402e am AK Nürnberg infolge der realen Klimaeinwirkungen für das Jahr 2018 ermittelt.

Um die Geometrie der Brücke und ihre Eigenschaften realitätsnahe abzubilden, wird die Simulation mit Volumenelementen (3D Finite Element Modell) durchgeführt. Die Elementaufteilung des Brückenquerschnitts ist in Abbildung 29 dargestellt.

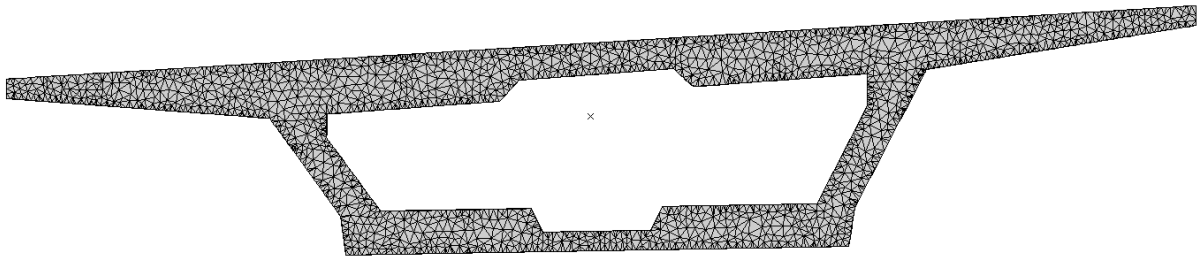


Abbildung 29: Elemente des Brückenquerschnitts

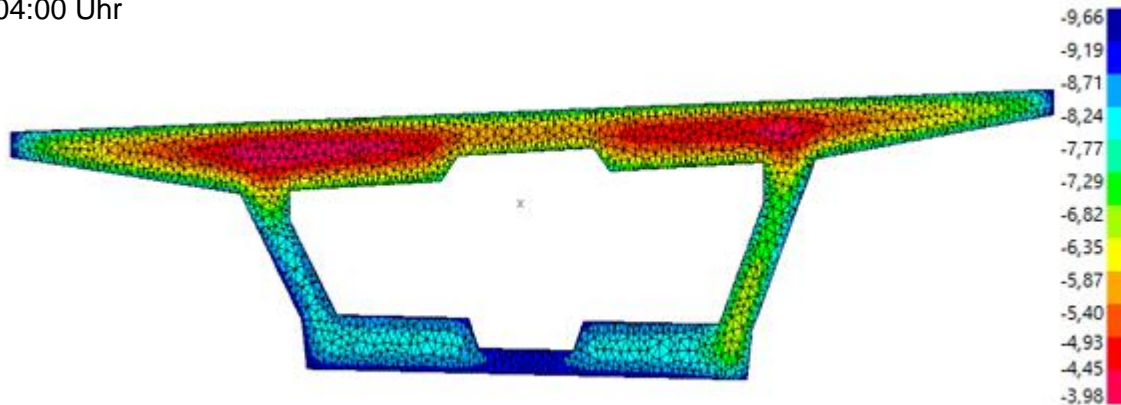
Die Berechnung wird an einem Brückenausschnitt geführt. Es wird angenommen, dass die Klimaeinwirkungen sich über die Längsausdehnung der Brücke nicht ändern.

Die Klimaeinwirkungen (ideale Außenlufttemperatur) sind entsprechend Orientierung unter Berücksichtigung der Kragarmverschattung wie in Abschnitt 4.2 dargelegt die äußeren Randbedingungen. Für die Innenlufttemperatur im Kasten wird die Außenlufttemperatur eingeführt. Die Materialeigenschaften Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Betons der Brücke sind einerseits von der konkreten Zusammensetzung des Betons und der Spezifik der Zuschlagstoffe und andererseits von der aktuellen Temperatur abhängig. Die Temperaturabhängigkeit ist erst ab einem Temperaturbereich von etwa 100° (Brandfall) relevant. Die Wärmeleitfähigkeit wurde entsprechend des spezifischen Gewichtes des Betons mit $2,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ angenommen und die spezifische Wärme mit $0,85 \text{ kJ/kg}^2\text{K}$.

Mit den genannten Randbedingungen und Materialeigenschaften wird die instationäre Temperaturverteilung im Brückenquerschnitt mit der Methode der Finiten Elemente mittels dem Programmsystem InfoGraph für das Jahr 2018 berechnet.

Wie im 4.3 dargelegt ist eine Anfangstemperaturverteilung zu definieren. Abbildung 30 zeigt die Temperaturverteilung im Brückenquerschnitt am 01.03.2018 um 4:00 Uhr und um 16:00 Uhr. Bitte die Skalierung beachten.

04:00 Uhr



16:00 Uhr

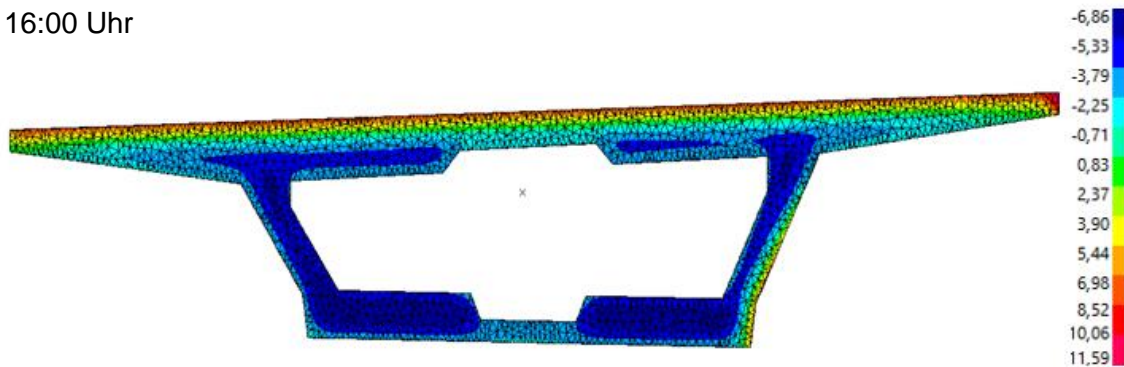


Abbildung 30: Temperaturverteilung im Querschnitt am 01.03.2018

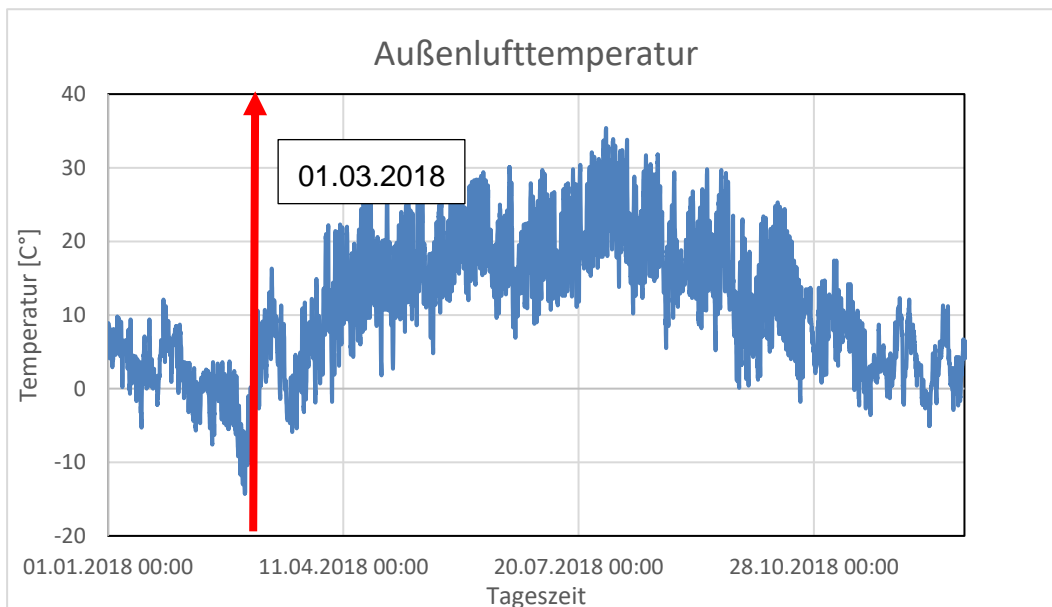


Abbildung 31: Außenlufttemperatur 2018

Die Abbildung 30 dokumentiert deutlich die klimatischen Einflüsse auf das Bauwerk. Die kalten Tage vor dem 01.03. beherrschen die Temperaturverteilung. Lediglich die horizontale und die südlichen Außenflächen zeigen am Nachmittag den Einfluss der Sonnenstrahlung.

4.4. Ermittlung der Kenngrößen der Temperatureinwirkungen auf Brücken

4.4.1. Allgemeines

Bauwerke, die im Freien stehen und den klimatischen Einwirkungen ausgesetzt sind, reagieren mit nichtlinearen instationären Temperaturfeldern im Querschnitt. Diese sind die Einwirkungen auf das Bauwerk

Die nichtlinearen instationären Temperaturfelder führen zu nichtlinearen instationären Dehnungen und Spannungen im Bauwerk, den Temperaturbeanspruchungen. Die Berechnung der Beanspruchungen auf diesem Weg ist möglich, aber nicht praxisüblich. Da trotz verfügbarer Rechentechnik Schnittgrößen und resultierende Bauwerksbeanspruchungen im Bauwesen in der Regel linear ermittelt werden, ist eine Ableitung von Kenngrößen aus den nichtlinearen instationären Temperaturfeldern (eine Zerlegung des Temperaturfeldes) zur linearen Beanspruchungsermittlung Stand der Technik.

4.4.2. Kenngrößen der Temperatureinwirkungen für Brücken

Eine Zerlegung der berechneten Temperaturfelder in mehrere idealisierte Temperaturanteile, welche einer konkreten mechanischen Wirkung zugeordnet werden (Abbildung 32) und einer realitätsgetreueren Repräsentation des nichtlinearen Temperaturfeldes dienen, führt zu den Kenngrößen der Temperatureinwirkung.

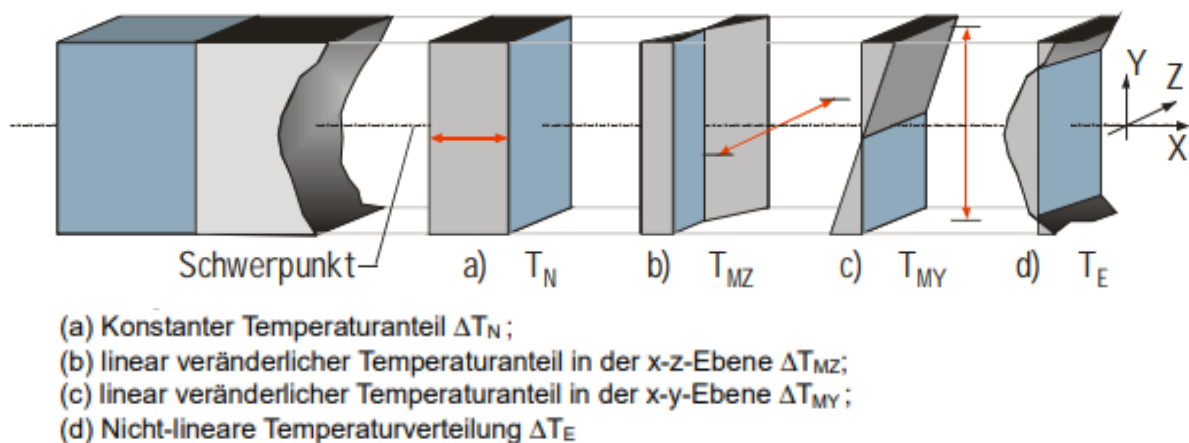


Abbildung 32: Kenngrößen der Temperatureinwirkungen (Temperaturanteile)

Entscheidender Vorteil einer Temperaturfeldzerlegung ist, dass für die Auswertung von Langzeit-Temperaturfeldsimulationen der Informationsgehalt reduziert werden kann auf eine begrenzte Zahl von idealisierten Temperaturanteil-Zeitreihen. Diesen Zeitreihen können in einem Folgeschritt Beanspruchungsreihen folgen. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass alle idealisierten Temperaturanteile gleichzeitig wirken. Extremwerte der einzelnen Temperaturanteile treten nicht gleichzeitig auf. Die Ableitung der Kenngrößen oder Temperaturanteile kann auf verschiedenen Wegen realisiert werden. Da hier letztlich Beanspruchungen gesucht werden erscheint eine dehnungsbezogene Zerlegung des Temperaturfeldes sinnvoll. Für eine konsistente Ermittlung der Beanspruchungen im Bauwerk auch unter dem Aspekt einer möglichen späteren Schädigung wird jedoch eine schnittgrößenbezogene Zerlegung ausgeführt. Die Definition schnittgrößen-bezogener Temperaturanteile entspricht der normativen Situation.

4.4.2.1. Bauwerksmitteltemperatur – der konstante Temperaturanteil ΔT_N

Die Bauwerksmitteltemperatur bzw. Schwerpunkttemperatur entspricht dem konstanten Anteil der Temperaturverteilung. Diese Temperatur verursacht in statisch bestimmt gelagerten Tragwerken konstante Volumendehnungen, da bei Brücken die Längenentwicklung überwiegt auch in Längsrichtung konstante Längsdehnung also keine Schnittgrößen, während bei statisch unbestimmt gelagerten Tragwerken diese zu Zwangsbeanspruchungen (Behinderung der freien Dehnung) führt.

Die Bauwerksmitteltemperatur wird aus der Temperaturverteilung des Gesamtquerschnitts durch die Gleichung (17) ermittelt:

$$DT_N = \frac{1}{A} \int \vartheta(y, z, t) dA \quad (17)$$

mit: A Fläche des Querschnitts
 $\vartheta(y, z, t)$ Temperatur der Teilfläche dA zum Zeitpunkt t ist.

4.4.2.2. Temperaturunterschied über die Querschnittshöhe

Der Temperaturunterschied über die Querschnittshöhe ist der Unterschied zwischen der Ober- und Unterseite des Querschnittes. Diese Temperatur verursacht Krümmungen und bei Behinderung der Verformung treten infolge dieser Temperatur Zwangsbeanspruchungen.

Der Temperaturunterschied über die Querschnittshöhe wird bei bekannter Temperaturverteilung im Querschnitt mit der Gleichung (18) berechnet:

$$DT_{MY} = \frac{1}{I_y} \int \vartheta(y, z, t)(z - z_s) dA \quad (18)$$

mit: I_y Trägheitsmoment des Querschnitts um y-Achse
 z Abstand von der Schwerachse
 z_s Flächenschwerpunkt

4.4.2.3. Temperaturunterschied über die Querschnittsbreite

Diese führen wie bei dem vertikalen Temperaturunterschied zu einer Krümmung in der Querrichtung und bei einer Behinderung zur Zwangsbeanspruchung.

Dieser Kennwert wird bei bekannter Temperaturverteilung mittels Gleichung (0.18) berechnet:

$$DT_{MZ} = \frac{1}{I_z} \int \vartheta(y, z, t)(y - y_s) dA \quad (19)$$

mit: I_z Trägheitsmoment des Querschnitts um z-Achse
 y Abstand von der Schwerachse
 y_s Flächenschwerpunkt

Aus Gründen der Kompatibilität mit der Indizierung der normativ festgelegten Temperaturanteile (vgl. Abbildung 32) findet eine Vertauschung der Indizes Y und Z statt. Somit ergibt sich für symmetrische Querschnitte:

Konstanter Temperaturanteil:

$$\Delta T_N = DT_N \quad (20)$$

Vertikaler Temperaturunterschied:

$$\Delta T_{MY} = DT_{MZ}h \quad (21)$$

Horizontaler Temperaturunterschied:

$$\Delta T_{MZ} = DT_{MY}b \quad (22)$$

wobei h die Querschnittshöhe ist und b die Querschnittsbreite ist.

4.4.2.4. Nichtlineare Temperaturverteilung

Der nichtlineare Temperaturanteil bewirkt weder Verformungen noch Schnittgrößen am Gesamtquerschnitt. Durch den nichtlinearen Temperaturanteil werden bei einem ungerissenen Querschnitt Eigenspannungen erzeugt, die über den Querschnitt Null sind und beim Bauwerk keine Schnittgrößen hervorrufen. Die entstehenden Spannungen werden bei einem gerissenen Querschnitt durch lokale Verformungen und Risse abgebaut. Aus diesem Grund wird bei Brücken in der Regel der nichtlineare Anteil des vollständigen Temperaturprofils nicht berücksichtigt.

4.4.3. Aufstelltemperatur

Jeder Querschnitt hat zum Zeitpunkt $\vartheta_{t=0}$ einen Temperaturzustand, die die ursprüngliche Temperatur des Querschnitts beschreibt. Zum einen späteren Zeitpunkt $t > 0$ ändert der Querschnitt seine Temperatur um ϑ_t . Bei Temperaturänderung gegenüber der ursprünglichen Temperatur dehnt sich der Querschnitt im Falle freier Verformungsmöglichkeit um das Maß ε aus, es wird mit der Gleichung (23) ermittelt:

$$\varepsilon = \alpha_T \Delta \vartheta = \alpha_T (\vartheta_t - \vartheta_0) \quad (23)$$

mit: α_T Wärmeausdehnungskoeffizient

Besitzt der Querschnitt in der Folgezeit die gleiche Temperatur des Ausgangszustandes, so sind alle temperaturbedingten Dehnungen gleich Null, und der Bauwerkszustand entspricht dem Ursprungszustand, deshalb wird diese Temperatur auch die Nullspannungstemperatur genannt. Unter Aufstelltemperatur wird die Temperatur verstanden, bei der im Beton unter Verformungsbehinderung ein spannungsfreier Zustand herrscht.

4.5. Die Kenngrößen der Temperatureinwirkung für die Brücke BW 402 e und das Jahr 2018

Im Folgenden werden die Kennwerte über das Jahr 2018 aufgezeigt. Die detaillierten Zeitreihen sind auf dem beiliegenden Datenträger enthalten (vgl. Erläuterungen in Absatz 6).

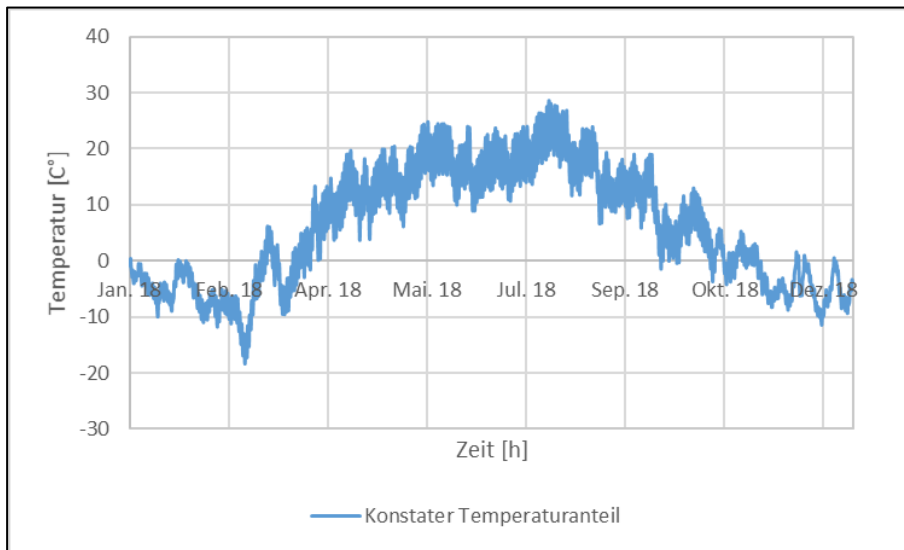


Abbildung 33: konstanter Temperaturanteil ΔT_N

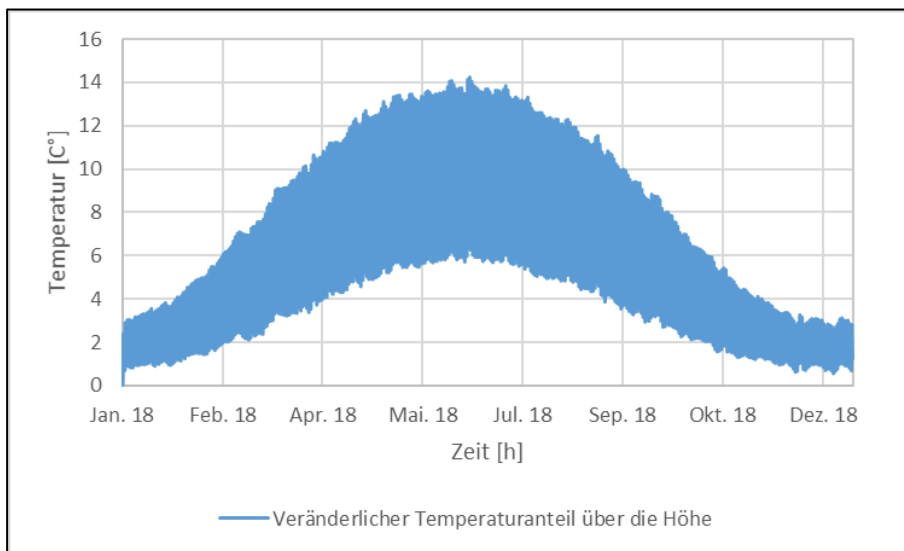


Abbildung 34: Veränderlicher Temperaturanteil über die Höhe $\Delta T_{M,y}$

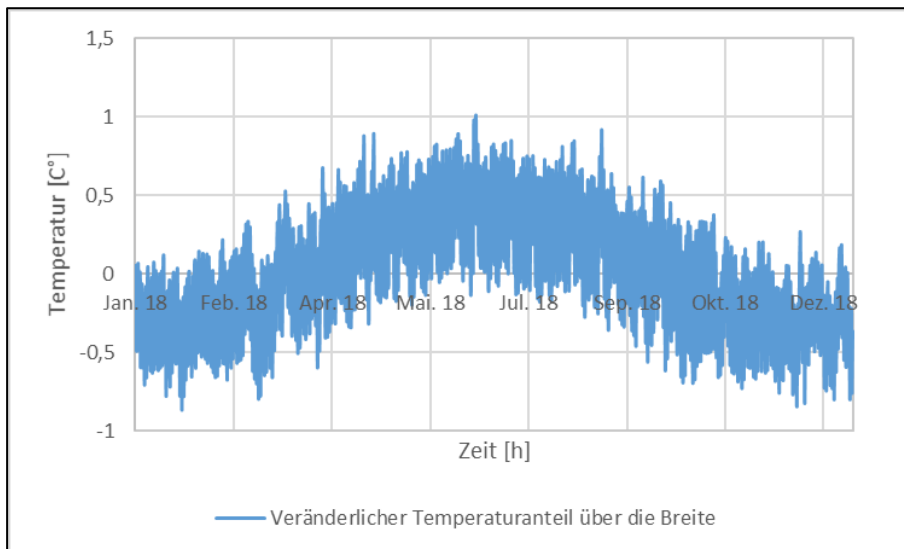


Abbildung 35: Veränderlicher Temperaturanteil über die Breite $\Delta T_{M,z}$

Der vertikale Temperaturanteil $\Delta T_{M,y}$ ist über das ganze Jahr positiv. In der Regel entstehen am frühen Morgen negative Temperaturanteile. Der Querschnitt, die Orientierung und die Lage der Brücke BW 402e weist für das Jahr 2018 keine negativen Anteile aus.

4.6. Referenzen der ermittelten Temperaturen und Temperaturanteilen durch Messungen am Bauwerk 402e und durch Literaturangaben

Es werden berechnete Temperaturwerte an der Brücke 402e am AK Nürnberg mit Temperaturwerten der Betonhohlkastenbrücke aus der Literatur und aus Messdaten verglichen, dafür wird die Betonhohlkastenbrücke im Denkendorf aus der Literatur [8] ausgewählt.

Die Brücke in Denkendorf wurde in dem Zeitraum von 01.10.2009 bis 30.09.2010 untersucht. Zum Vergleich der Ergebnisse wird der Zeitraum von 01.01.2010 bis 30.09.2010 ausgewählt.

Die Temperatureinwirkungen hängen auch von der Außenlufttemperatur ab. Die Abbildung 36 zeigt den Verlauf der Außenlufttemperatur der Brücke im Denkendorf für den ausgewählten Zeitraum und den der Brücke 402e am AK Nürnberg für den gleichen Zeitraum am 2018.

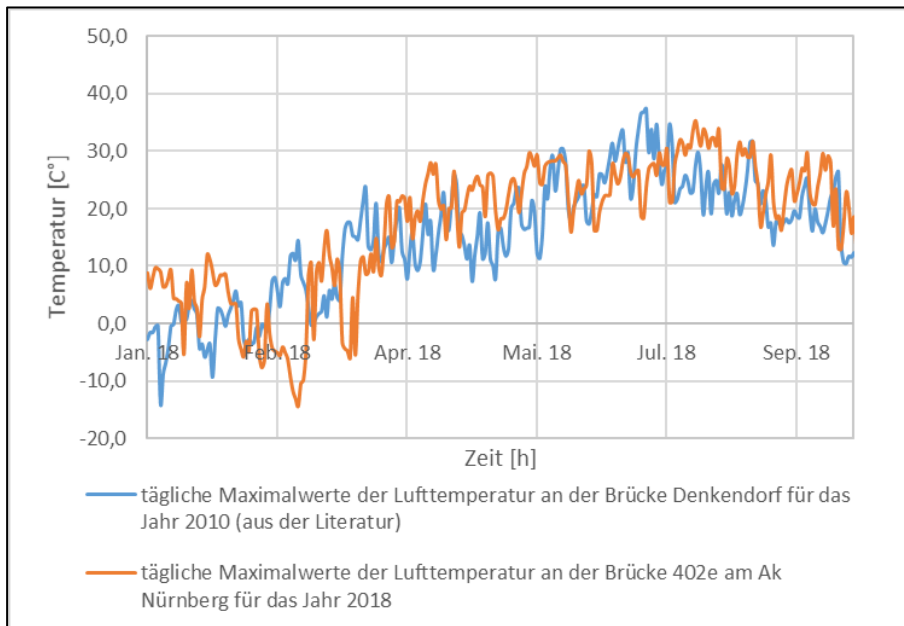


Abbildung 36: Gegenüberstellung von Außenlufttemperaturen der Brücke Denkendorf und der Brücke 402e Nürnberg

Die Abbildung 37 stellt den Verlauf des konstanten Temperaturanteils ΔT_N der Brücke im Denkendorf mit der Brücke 402e am AK Nürnberg dar.

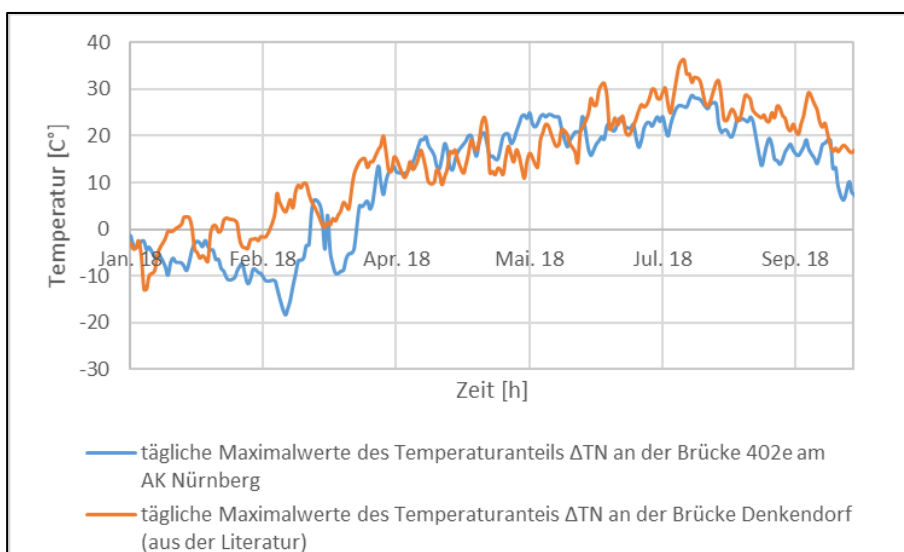


Abbildung 37: Tägliche Maximalwerte des Temperaturanteils ΔT_N an der Brücke Denkendorf und der Brücke 402e AK Nürnberg

Die Abbildung 38 für das BW 402e stellt den Verlauf des konstanten Temperaturanteils und der Außenlufttemperatur an der Brücke 402e am AK Nürnberg für das Jahr 2018 gegenüber.

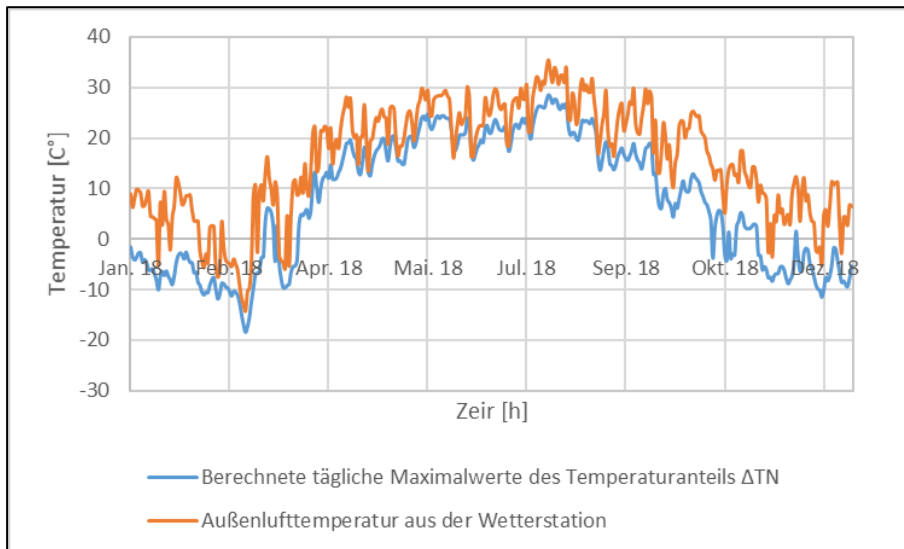


Abbildung 38: Berechnete tägliche Maximalwerte des Temperaturanteils ΔT_N und der Außenlufttemperatur für das Jahr 2018

Die berechnete Temperatur wird mit gemessenen Temperaturwerte verglichen. Die Brücke in Nürnberg ist mit zwei Temperatursensoren im Querschnitt ausgestattet, derer Stelle in der Abbildung 39 dargestellt ist. Der Sensor (MST6T1u) steht in 150 mm und der Sensor (MS6T2o) in 2000 mm Höhe über der Unterkante Querschnitt. Die Abbildung 40 und Abbildung 41 stellen die stündlich berechneten und gemessenen Temperaturen für die Sensoren gegenüber.

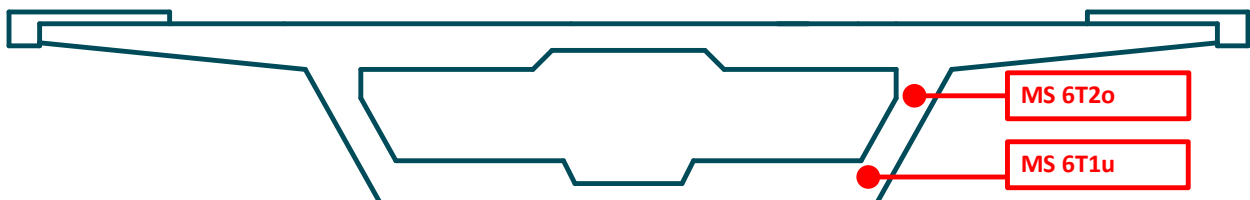


Abbildung 39: Temperaturmessstellen im Querschnitt von Bauwerk 402e

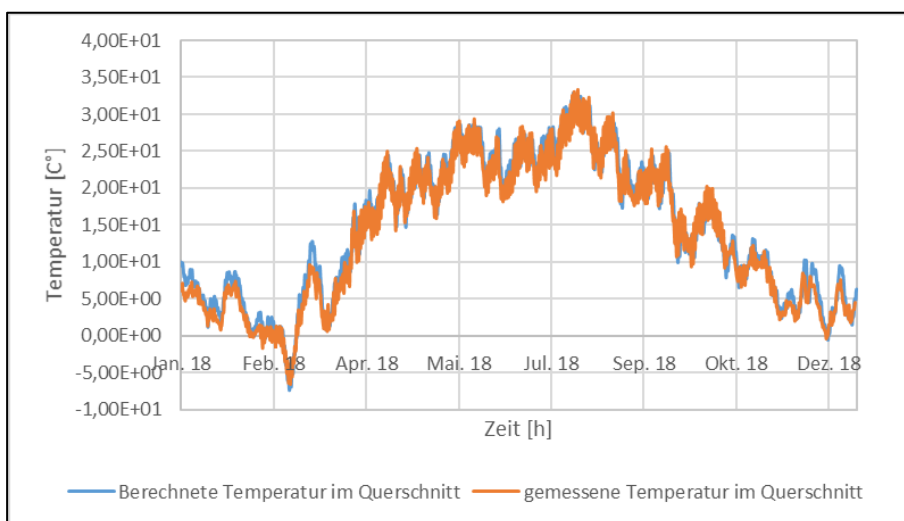


Abbildung 40: Vergleich der gemessenen Temperatur an dem Sensor (MS6T2o) mit der berechneten Temperatur für das Jahr 2018

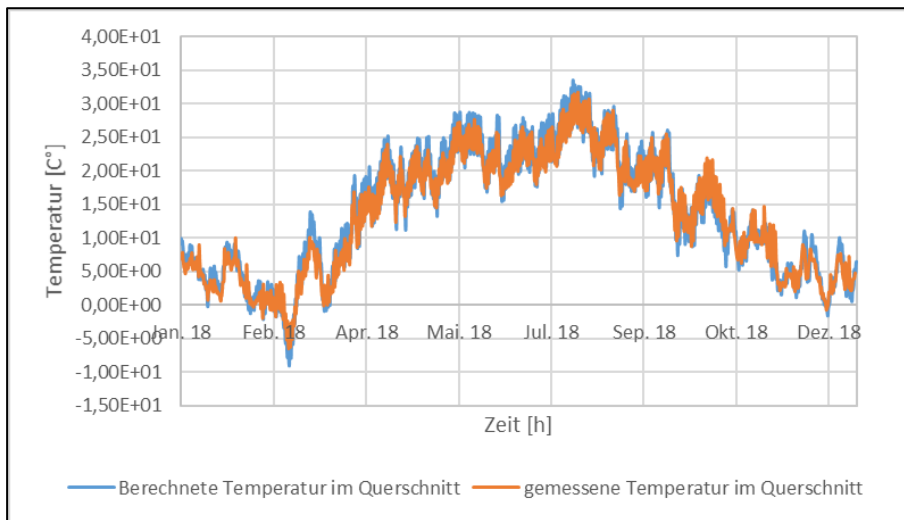


Abbildung 41: Vergleich der gemessenen Temperatur an dem Sensor (MST6T1u) mit der berechneten

Die Abbildungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten im Querschnitt. Die vorhandenen Abweichungen sind darauf zurückzuführen, dass die Berechnung mit einem über den Tag konstanten Konvektionswärmeübergangskoeffizienten durchgeführt wird und die Bewölkung nicht berücksichtigt wird.

5. Tragwerksmodellierung

5.1. Modellbeschreibung

5.1.1. Allgemeines

Es wurden zwei Finite Element Modelle (FEM) der Spannbetonbrücke mithilfe der kommerzielle Software InfoCAD der Firma InfoGraph GmbH anhand der vorliegenden Unterlagen des Bauwerkes BW 402e erstellt. Für die Erstellung von Einflussflächen für die Erzeugung von künstlichen Sensordaten aus Beanspruchungen infolge Straßenverkehr (überfahrende Fahrzeuge) wurde ein Schalenelementmodell verwendet. Künstliche Sensordaten infolge Temperaturbeanspruchungen wurden unter Verwendung eines Balkenmodells abgeleitet.

Basis sowohl der Modellierung selbst als auch der Art und Weise der Weiterverwendung der Einflussflächen bzw. Temperaturkennwerte ist die Annahme von linear-elastischem Materialverhalten sowohl für die Abbildung des ungeschädigten Tragwerkes als auch für die Modellierung von Schädigungsszenarien.

5.1.2. Schalen-Modell

Im ersten Modell wird das Tragwerk räumlich mit Schalelementen abgebildet. Zur realitätsnahen Widerspiegelung der Steifigkeitsverhältnisse wurden dabei die Dicken der Schalelemente in Tragwerkslängsrichtung und Tragwerksquerrichtung auf Basis der vorliegenden Bauwerksunterlagen angepasst. In Abbildung 42 ist exemplarisch ein Querschnittsbereich des Bauwerkes im FE-Modell dargestellt.

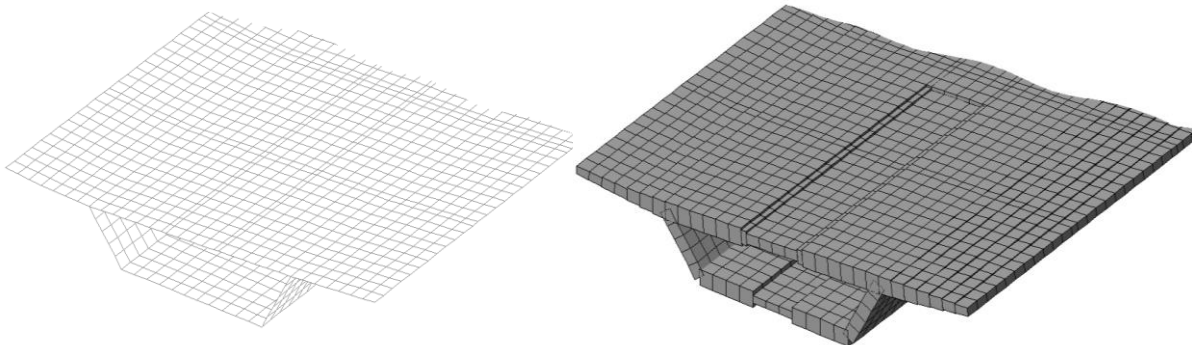


Abbildung 42: Querschnitt der Brücke im FEM Modell

Die externen Vorspannglieder wurden durch Stab-Elementen abgebildet. Dabei wurde die Übertragung von Momenten an den Enden der Stabelemente freigegeben, um eine reine Übertragung von Normalkräften zu realisieren. In Abbildung 43 ist das modellierte Vorspannsystem dargestellt.

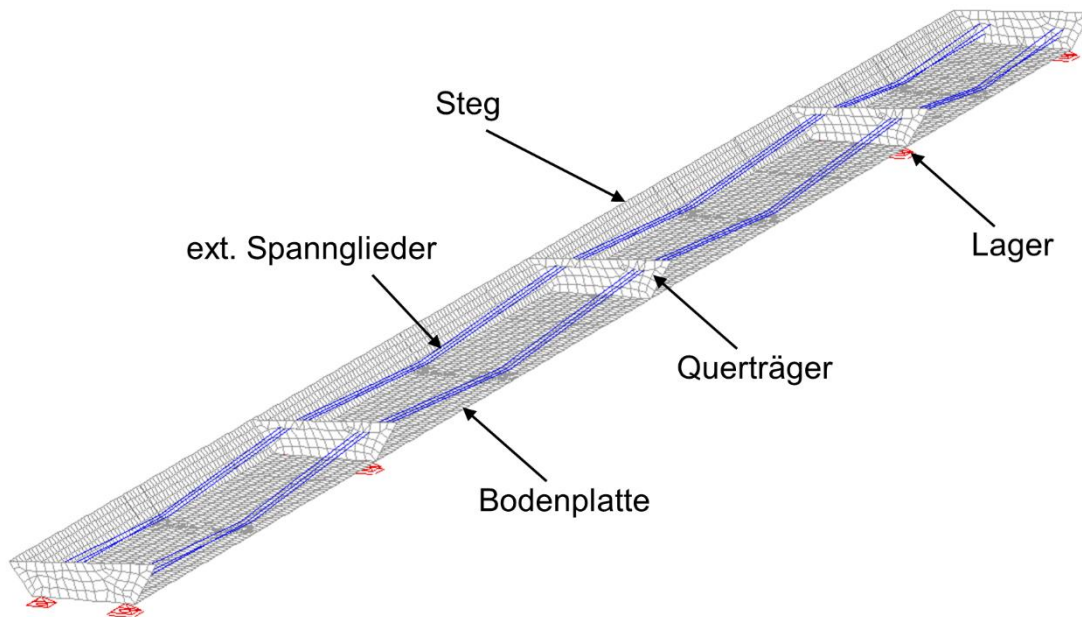


Abbildung 43: Darstellungen des erstellten FE-Modells (Fahrbahnplatte und rechter Steg sind zur Visualisierung in der Darstellung ausgeblendet)

Die Erzeugung der erforderlichen Einflussflächen der Dehnungen ε an den definierten Sensorstellen (vgl. Absatz 2.3) erfolgte aus programmintern erzeugten Einflussflächen der Elementschnittgrößen n (Normalkraft) und m (Moment) unter Ansatz der nachfolgenden Gleichung (24) (vgl. auch Abbildung 44).

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \cdot \left(\frac{n}{a} \pm \frac{m}{I} y \right) \quad (24)$$

mit:	E	Elastizitätsmodul Beton
	a	Querschnittsfläche
	I	Flächenmoment
	n	Normalkraft
	m	Moment

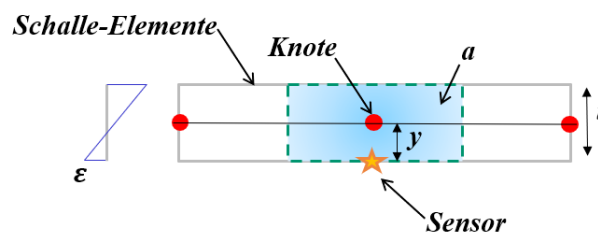


Abbildung 44: Prinzipdarstellung – Dehnungsberechnung aus Elementschnittgrößen

In den nachfolgenden Darstellungen sind exemplarische Ergebnisse dieser Aufbereitung der Ergebnisse des FE-Modells hin zu Einflussflächen der Dehnung zusammengestellt. In Abbildung 45 und Abbildung 46 sind die Einflussflächen der Elementschnittgrößen für die Messstelle „MQ_3_Ms_U_Re_Int_u“ (vgl. Abbildung 9) dargestellt. Die resultierende Einflussfläche der Dehnung an der Messstelle ist in Abbildung 47 aufgezeigt. Für die Messstelle „MQ_3_Ms_U_Li_Int_u“ sind die entsprechenden Darstellungen in Abbildung 48 bis Abbildung 50 aufgeführt.

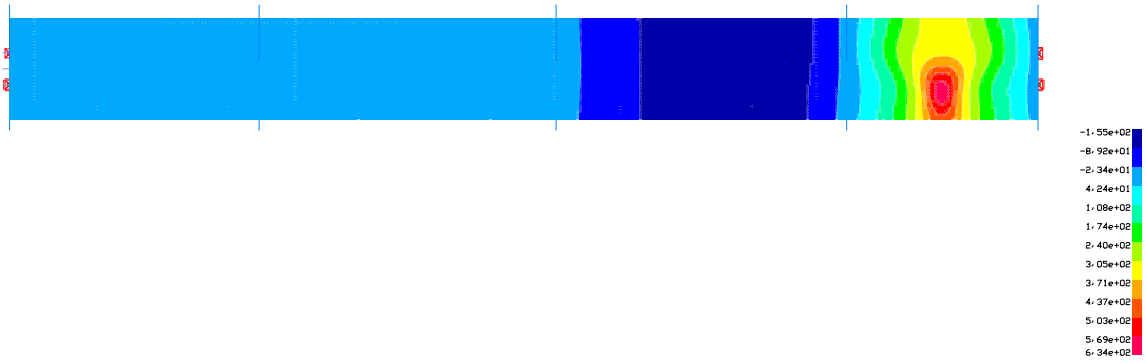


Abbildung 45: Einflussfläche – Elementschnittgröße n_x – Messquerschnitt MQ 3, Messtelle „MQ_3_Ms_U_Re_Int_u“

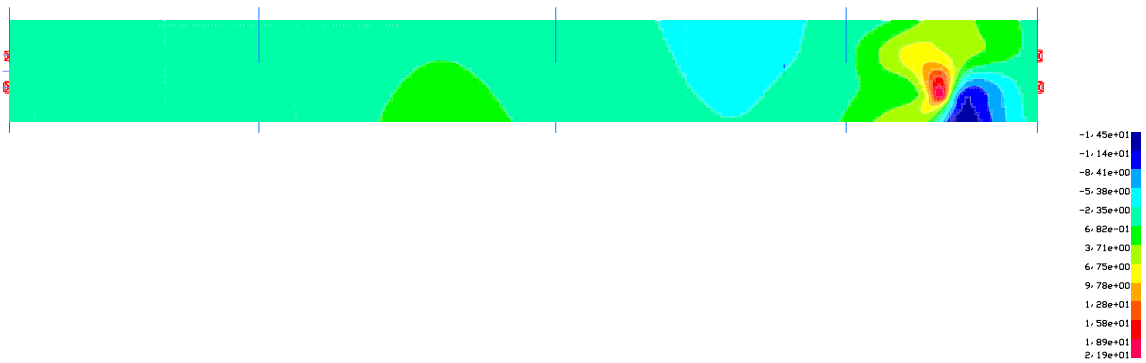


Abbildung 46: Einflussfläche – Elementschnittgröße m_x – Messquerschnitt MQ 3, Messtelle „MQ_3_Ms_U_Re_Int_u“

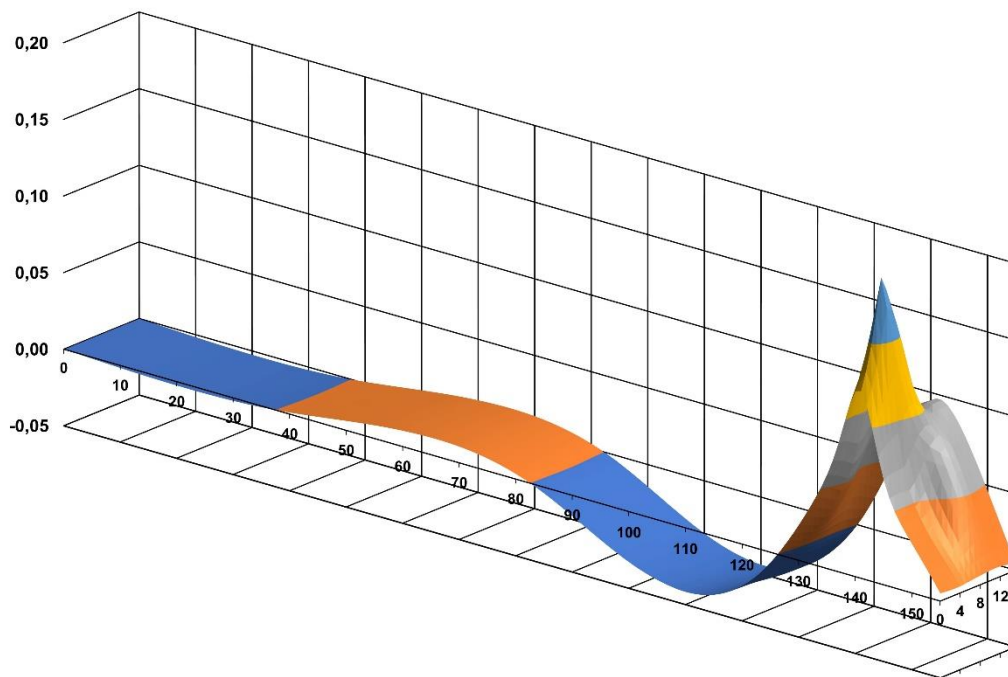


Abbildung 47: Einflussfläche – Dehnung ϵ – Messquerschnitt MQ 3, Messtelle „MQ_3_Ms_U_Re_Int_u“



Abbildung 48: Einflussfläche – Elementschnittgröße n_x – Messquerschnitt MQ 3, Messtelle „MQ_3_Ms_U_Li_Int_u“



Abbildung 49: Einflussfläche – Elementschnittgröße m_x – Messquerschnitt MQ 3, Messtelle „MQ_3_Ms_U_Li_Int_u“

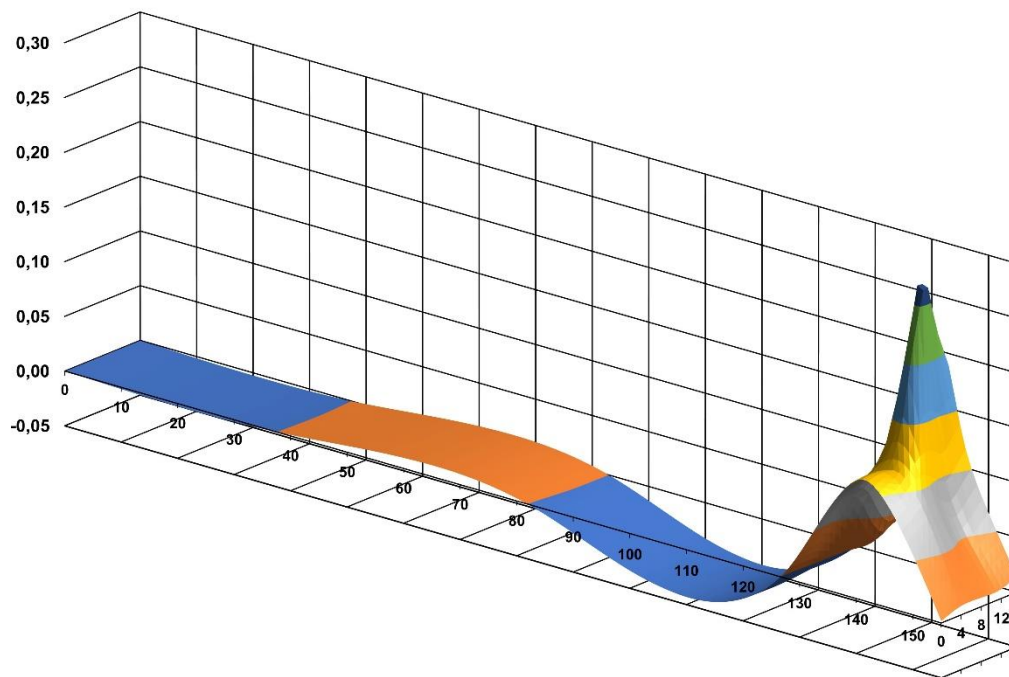


Abbildung 50: Einflussfläche – Dehnung ϵ – Messquerschnitt MQ 3, Messtelle „MQ_3_Ms_U_Li_Int_u“

Für die Ermittlung der Einflussflächen der Neigung und der Verschiebung an den betrachteten Stellen der Messquerschnitte konnte nicht analog zur Dehnung auf programminterne Hilfsmittel zurückgegriffen werden. Des Weiteren kann sinnvoll davon ausgegangen werden, dass die Neigung „um die Querrichtung“ des Tragwerkes sowie die Verschiebung in Längsrichtung des Tragwerkes an der gewählten Stelle des Querschnittes nicht wesentlich von einer Lastposition in Querrichtung abhängig ist. Die Ermittlung von Einflussflächen vereinfacht sich dadurch zu einer Ermittlung von Einflusslinien. Umgesetzt wurde dies durch den Ansatz einer freien Linienlast in Querrichtung entsprechend Abbildung 51. Diese Linienlast wurde in einzelnen Lastfällen „schrittweise“ in Längsrichtung angesetzt. Für jeden Lastfall wurden anschließend die Werte der Knotendeformation (Verschiebungen und Verdrehungen bzw. Neigung) an den definierten Messstellen exportiert und aufbereitet.

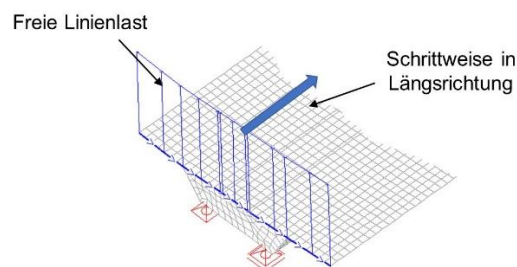


Abbildung 51: Ansatz einer freien Linienlast in Querrichtung, Schrittweiser Ansatz in Längsrichtung

Aus Gründen der einheitlichen Verarbeitung wurden die eigentlichen Einflusslinien der Neigungen bzw. Verschiebungen zu Einflussflächen umgewandelt. Diese Einflussflächen weisen damit keine veränderliche Ausprägung der Form in Querrichtung auf. Exemplarisch sind nachfolgend in Abbildung 52 und Abbildung 53 die Einflussflächen für die Neigung und die Verschiebung an Messquerschnitt 1 dargestellt.

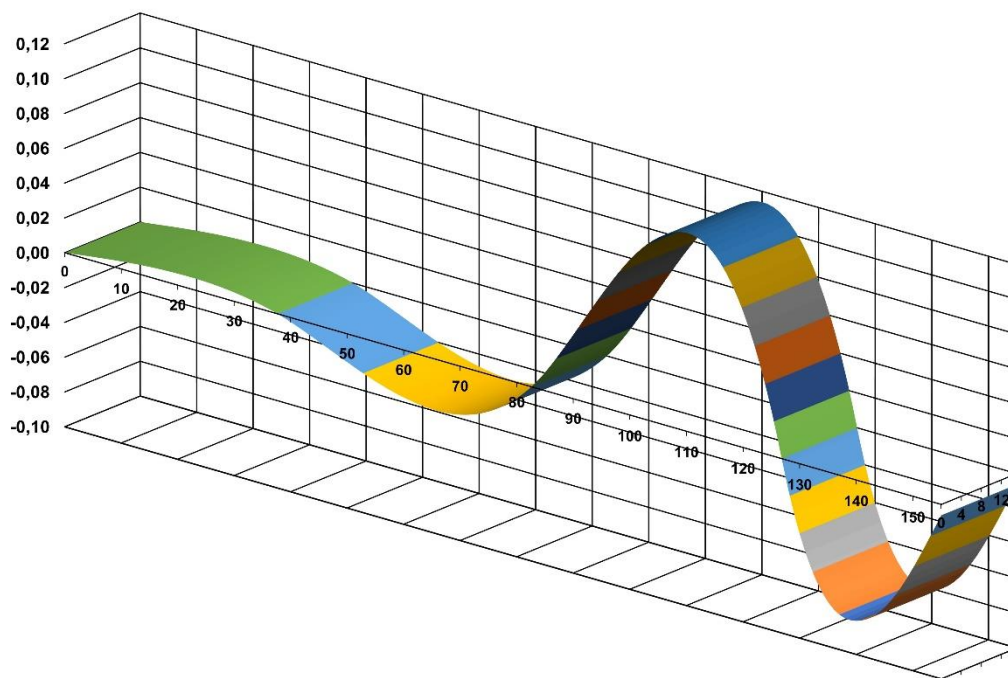


Abbildung 52: Einflussfläche – Neigung – Messquerschnitt MQ 1, Messtelle „MQ_1_MS_U_Neig“

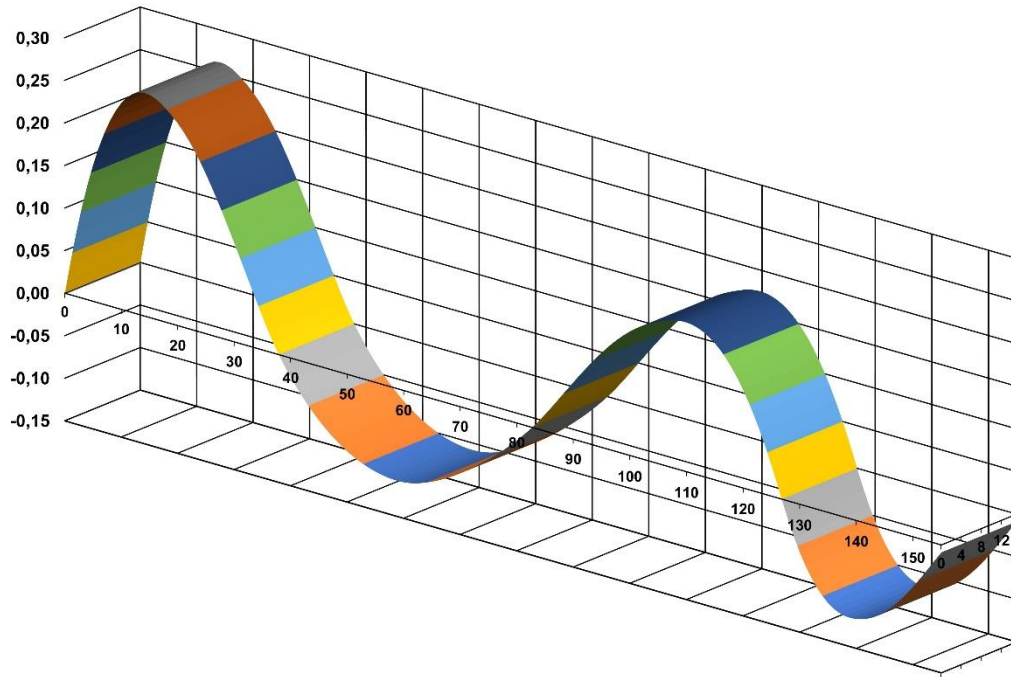


Abbildung 53: Einflussfläche – Verschiebung – Messquerschnitt MQ 1, Messtelle „MQ_1_MS_U_Schieb“

5.1.3. Balken-Modell

5.1.3.1. Allgemeines

Tragwerksreaktionen infolge Temperatureinwirkungen (linear veränderliche Temperaturanteile ΔT_{Mz} und ΔT_{My} , konstanter Temperaturanteil ΔT_N) werden in den vorliegenden Untersuchungen anhand eines Balken-Modells des Tragwerkes abgeleitet.

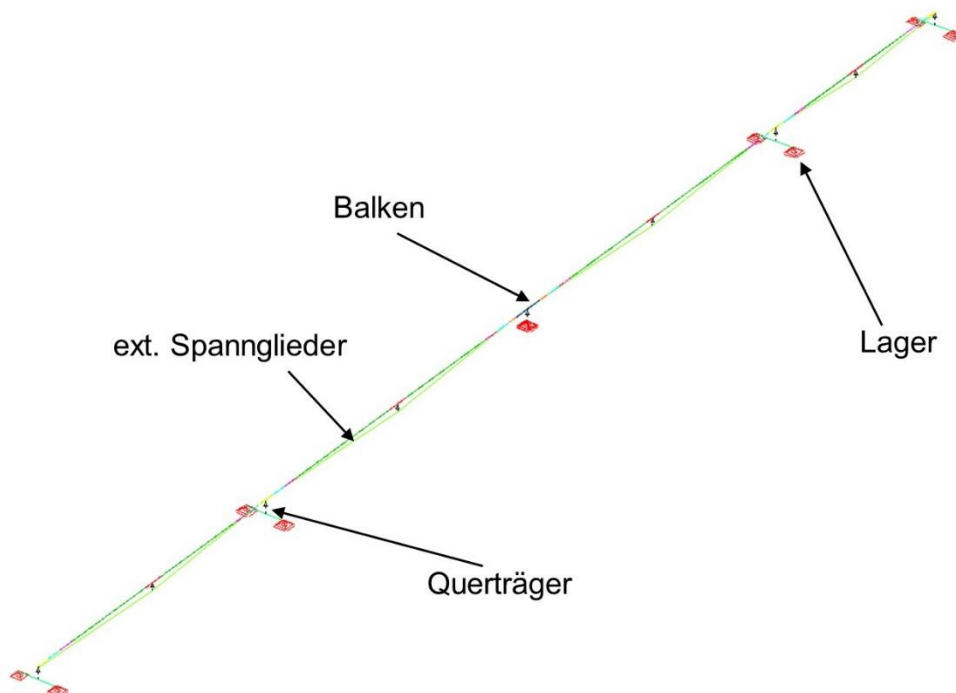


Abbildung 54: Balkenmodell – Darstellungen des erstellten FE-Modells

5.1.3.2. Temperaturbeanspruchungen

Ziel der Ermittlung sind die Temperaturbeanspruchungen der Brücke BW 402e entsprechend der Aufgabe in Form von Dehnungen, Verschiebungen und Neigungen. Dehnungen infolge Temperatur entstehen nur, wenn keine Behinderung dieser gegeben ist. Andernfalls entstehen infolge der behinderten Dehnungen Spannungen.

In statisch bestimmten Tragsystemen entstehen aus Temperaturfeldern mit Ausnahme der nichtlinearen Eigenspannungen nur Verformungen also freie Dehnungen. In statisch unbestimmten Systemen entstehen abhängig von der Art der Behinderung und dem Grad der Behinderung freie Dehnungen und Zwängungen.

Bei der Brücke BW 402e in Nürnberg handelt es sich um einen gelagerten Durchlaufträger über 4 Felder. Damit ist die Ausdehnung in Längsrichtung nicht oder nur durch den Verschiebewiderstand der Lager behindert. Hier ist die freie Dehnung gegeben. Ein Temperaturverlauf über die Höhe des Querschnittes führt zu Aufwölbungen jeweils in Richtung der wärmeren Seite. Diese Aufwölbung ist durch die Stützung an den Lagerungspunkten behindert. Der Grad der Behinderung hängt wesentlich von der Steifigkeit des Tragsystems ab.

In mehreren Forschungsarbeiten und Dissertationen wird gezeigt, dass beim Beton unvermeidbare Mikrorissbildungen die Behinderung auch im Gebrauchszustand weitestgehend abbauen. Da die vorliegenden Untersuchungen auf „reale“ Sensordaten (Messwerte) orientieren müssen zusätzlich Aspekte praktischer Bauwerksmessungen hinsichtlich der Temperaturbeanspruchungen analysiert werden.

Wie dargestellt werden die Kennwerte Dehnungen, Verschiebungen und Neigungen untersucht. Dehnungsmessungen werden meist durch elektrische oder optische Dehnmessstreifen ermittelt. Das Ziel von Dehnungsmessungen ist die Analyse des Baustoff- oder Bauteilverhaltens. Das ist nur bei einer direkten Verfolgung von Einwirkung und der resultierenden Beanspruchung möglich. Infolge des dargelegten Tragwerksverhaltens von Betonbrücken hinsichtlich Zwangsbeanspruchungen werden mit Ausnahme von technologischen Temperatureinwirkungen oder Brandszenarien Dehnungen infolge Last gesucht.

Deshalb werden nicht erwünschte zeitgleiche Dehnungen aus anderen Einwirkungen möglichst eliminiert. Elektrische und optische DMS werden beim Einsatz am Bauwerk temperaturkompensiert. Wird beispielsweise die Dehnung eines Stabes mit einem kleinen Querschnitt gemessen, so wird ein Zwilling neben dem Stab ohne Last gebracht und durch eine Brückenschaltung die Temperaturdehnung kompensiert. Im Fall einer Brücke ist das so nicht möglich. Es wird deshalb ein „Stück“ Vergleichsmaterial neben den eigentlichen Sensor appliziert und damit die Temperatur an der Stelle des Sensors kompensiert.

Für dem Dehnungsmesswert ist deshalb Folgendes zu beachten:

Die nachfolgende Abbildung 55 zeigt schematisch die Situation am Beispiel einer Sensorposition. Über die Querschnittshöhe ist eine reale nichtlineare Temperaturverteilung prinzipiell skizziert. Es sind die genannten Anteile T_N und das zugehörige ΔT_M und die zum Ebenbleiben des Querschnitts erforderliche Eigenspannung dargestellt. Der Verlauf der Eigenspannung entspricht dabei der realen Temperaturverteilung. Es ist ein Sensor positioniert und damit ist erkennbar um welche Temperaturgröße der Dehnungswert kompensiert wird.

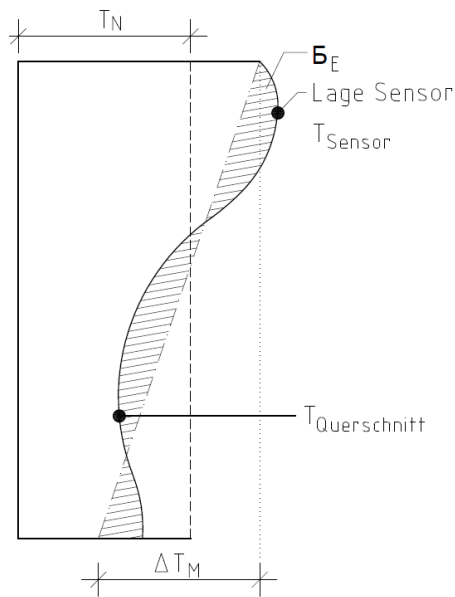


Abbildung 55: Temperaturverteilung mit Sensorposition

Im vorliegenden Fall wird an einer Brücke mit Hohlkastenquerschnitt, die als Durchlaufträger über vier Felder ausgelegt ist, gemessen. Der Anteil ΔT_N führt beim Durchlaufträger mit einem Festpunkt und verschieblichen Lagern zu einer Verschiebung und im Querschnitt zu einer freien Dehnung.

$$\varepsilon_{\Delta T_N} = \alpha_t \times \Delta T_N \quad (25)$$

Der Anteil ΔT_M führt beim statisch unbestimmten Durchlaufträger zu freien Verformungen und einem Zwangsmoment. Die freien Verformungen und das Zwangsmoment teilen sich je nach Steifigkeit und Risszustand des Tragwerkes auf. Eine vollständige Verformungsbehinderung würde nur Zwangsbeanspruchungen zur Folge haben, die jedoch mit zunehmender auch Mikrorissbildung bis auf Null abnehmen und zu freien Verformungen werden.

$$\varepsilon_{\Delta T_M} = \frac{M(\Delta T_M)}{E \div I} \times z + \frac{\alpha_t \times (T_u - T_o)}{h} \times z \quad (26)$$

Bei Temperaturkompensation des eingetragenen Sensors in Abbildung 55 liegt am Sensor aus Temperatur folgende Dehnung an:

$$\varepsilon_{\text{Messung}} = \varepsilon_{\Delta T_N} + \varepsilon_{\Delta T_M} - \alpha_t \times T_{\text{Sensor}} \quad (27)$$

Eigenspannungen führen nicht zu Dehnungen. Weitere Temperaturkomponenten werden nicht betrachtet. Für die beabsichtigte Zielstellung ist deshalb eine Überlagerung von Temperatur und Verkehr nicht sinnvoll. Die stündlichen Werte der Temperaturanteile werden jedoch als Temperaturwerte (ΔT_N , $\Delta T_{M,y}$, $\Delta T_{M,z}$) ausgewiesen und übergeben. Neigungen und Verschiebungen aus den Temperaturanteilen werden ermittelt und überlagert. Im vorliegenden Fall wurden Neigungen und Verschiebungen über Wegaufnehmer ermittelt, die nicht temperaturkompensiert werden.

5.1.3.3. Kennwerte der Einheitstemperaturbeanspruchungen

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden Neigungen und Verschiebungen infolge Temperaturbeanspruchungen betrachtet. Zur Ermittlung von Einheits-Kennwerten aus Temperatur wurden am Balkenmodell entsprechenden Lastfälle angesetzt und Knotenverformungen berechnet. Aus den Knotenverformungen (Knotenverschiebung in betrachtet Richtung bzw. Knotenverdrehung um betrachtete Achse) lassen sich diese Kennwerte direkt aus den Ergebnissen der FE-Berechnung ableiten. Die so ermittelten Einheits-Kennwerte werden anschließend mit den separat ermittelten Temperatureinwirkungen (vgl. Abschnitt 4) multipliziert und somit Sensorwerte aus Temperatureinwirkungen erzeugt. In nachfolgender Tabelle 4 sind die ermittelten Werte aufgelistet.

Tabelle 4: Kennwerte für Einheits-Temperaturbeanspruchungen

Messstelle	Faktor für ΔT_N	Faktor für $\Delta T_{M,z}$ (vertikal)	Faktor für $\Delta T_{M,y}$ (horizontal)	Einheit
MQ_1_MS_U_Neig	$-5,778 \cdot 10^{-10}$	$-9,014 \cdot 10^{-6}$	$-1,319 \cdot 10^{-16}$	rad
MQ_1_MS_U_Schieb	$1,268 \cdot 10^{-3}$	$5,881 \cdot 10^{-5}$	$-1,203 \cdot 10^{-4}$	m
MQ_2_MS_U_Neig	$-7,923 \cdot 10^{-10}$	$-1,017 \cdot 10^{-5}$	$-3,432 \cdot 10^{-17}$	rad
MQ_3_MS_U_Neig	$1,858 \cdot 10^{-10}$	$-5,005 \cdot 10^{-6}$	$1,643 \cdot 10^{-17}$	rad
MQ_4_MS_U_Neig	$4,935 \cdot 10^{-10}$	$2,154 \cdot 10^{-6}$	$4,163 \cdot 10^{-17}$	rad
MQ_5_MS_U_Neig	$9,946 \cdot 10^{-10}$	$2,869 \cdot 10^{-5}$	$6,608 \cdot 10^{-17}$	rad
MQ_5_MS_U_Schieb	$1,558 \cdot 10^{-3}$	$5,868 \cdot 10^{-5}$	$-1,203 \cdot 10^{-4}$	m

5.1.3.4. Vergleiche Rechnung- Messung

Bei einem Durchlaufträger mit einem Festpunkt verursacht der konstante Temperaturanteil ΔT_N eine Längenänderung in der Längsrichtung. Die berechnete Verschiebung infolge des Temperaturanteils ΔT_N wird mit der gemessenen Verschiebung an der Achse 40 überprüft und in der Abbildung 56 dargestellt.

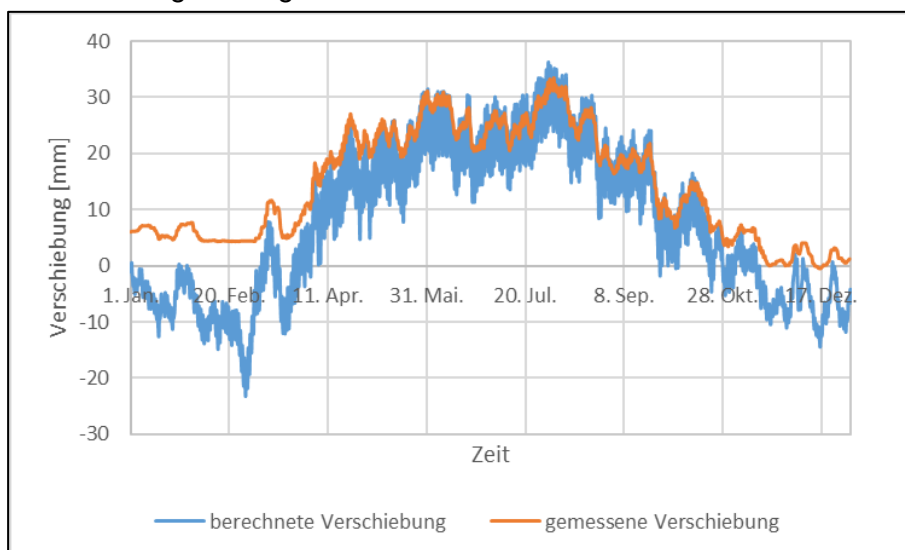


Abbildung 56: Berechnete und gemessene Verschiebung an der Achse 40

Die Abbildung 56 zeigt eine Übereinstimmung in der Sommerperiode und Unstimmigkeiten in der Winterperiode. Anfang 2018 war der Messbereich des Wegaufnehmers erreicht und deshalb sind die Messwerte nicht zutreffend.

5.2. Abbildung von Schädigungen

Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchungen ist die Abbildungen von verschiedenen Schädigungsszenarien in den erstellten Tragwerksmodellen und daraus folgend die Erzeugung von künstlichen Sensordaten an einem geschädigten Tragwerk. Hierfür wurden entsprechend der Beauftragung drei Schädigungsszenarien betrachtet. Nachfolgend werden diese kurz beschrieben und die Umsetzung in den Modellen erläutert.

Schädigungsszenario 1 (SZ 1) bildet eine lokal begrenzte, schleichend zunehmende Schädigung des Tragwerkes ab. Hierbei kann es sich in der Realität zum Beispiel um eine chloridinduzierte Korrosion des schlaffen Betonstahls handeln. Im Tragwerksmodell selbst wird Beton und Betonstahl nicht separat abgebildet. Zur Umsetzung des Schädigungsszenarios wurde eine lokal begrenzte Abminderung der Steifigkeit des Querschnittes über eine Reduzierung des E-Moduls um 30 % (ungeschädigt 35.000 MN/m^2 , geschädigt 24.500 MN/m^2) im Tragwerksmodell in Feld 4 vom Momentennullpunkt aus Eigengewicht bis zur Achse 50 abgebildet.

Schädigungsszenario 2 (SZ 2) bildet einen lokal begrenzten plötzlich eintretenden Schaden wie zum Beispiel den Bruch eines Spanngliedes im Verbund ab. Auch hier wurde im Tragwerksmodell eine Reduzierung des E-Moduls abgebildet. Dabei wurde der Wert auf 50 % des Ausgangswertes (geschädigt 17.500 MN/m^2) reduziert. Der geschädigte Bereich wurde mit einer Länge von 4 m im Feld 4 zwischen Messquerschnitt 2 und 3 angesetzt.

In nachfolgender Abbildung 57 sind die geschädigten Bereiche in SZ 1 und SZ 2 in einer Prinzipdarstellung aufgeführt.

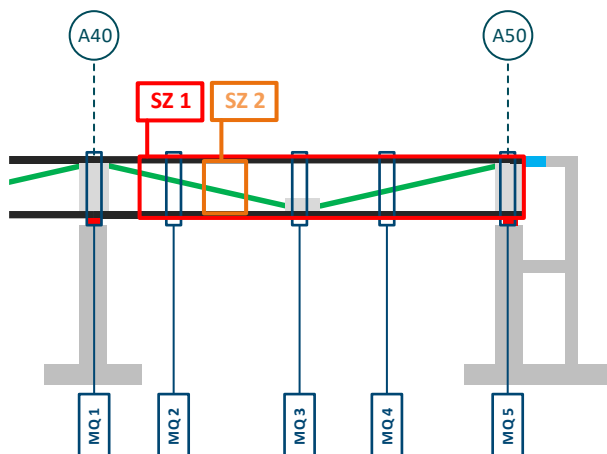


Abbildung 57: Lokalisation der geschädigten Bereiche in SZ 1 und SZ 2, Bereich zwischen Achse 40 und Achse 50 – Prinzipdarstellung ohne Maßstab

Schadenszenario 3 (SZ 3) bildet global wirkende, schleichend zunehmende Schädigung des Tragwerkes ab. Hierbei könnte es sich in der Realität zum Beispiel um eine Versteifung der Lagerung handeln. In einem realen Tragwerk würde solch eine Schädigung der Lagerung vordergründig zu Rissbildungen in der Lagerung führen und damit keine deutlichen Auswirkungen auf den Überbau selbst zeigen. Um dennoch Tendenzen ableiten zu können, wurde zur Abbildung dieses Szenarios eine Änderung der Lagerungsbedingung in den Tragwerksmodellen entsprechend nachfolgender Abbildung 58 an Lagerachse 40 und 50 in Lagerreihe 1 umgesetzt. Hierbei wurde keine starre Festhaltung der vorher frei in Längsrichtung verschieblichen

Lagerungen eingeführt, sondern eine Feder mit einer sehr hohen Federsteifigkeit von 10.000 MN/m. An den übrigen Lagerungspunkten wurde in den Modellen keine Änderung vorgenommen.


ANGABEN ZUR LAGERUNG		Bemessungswerte (Design-Werte)				
						
ACHSE	LAGERREIHE	10	20	30	40	50
	1	○	⊕		⊕	⊕
	2			⊕		
	3	⊕	⊕		⊕	⊕

Abbildung 58: Lagerungssystem – Schädigungsszenario 3 – Feder 10.000 MN/m

Mit den beschriebenen Änderungen wurden die Einflussflächen bzw. Kennwerte aus Temperaturbeanspruchung entsprechend den Erläuterungen in Absatz 5.1.2 bzw. 5.1.3 ermittelt. Im nachfolgenden Absatz werden die aus den betrachteten Schädigungsszenarien resultierenden Effekte dokumentiert.

5.3. Tragwerksreaktionen infolge Schädigungsszenarien

5.3.1. Vorbemerkungen

Die im vorhergehenden Absatz 5.2 beschriebenen Schädigungsszenarien fñhrend durch die umgesetzte Abbildung der Szenarien in den erstellten Tragwerksmodellen zu Änderungen der Einflussflächen bzw. der ermittelten Kennwerte für die Einheits-Temperaturbeanspruchungen. Diese Änderungen werden nachfolgend durch grafische Darstellungen aufgezeigt.

5.3.2. Äußere Beanspruchungen

Für die quantitative Einschätzung der Änderungen der Tragwerksreaktionen infolge der Schädigungsszenarien wurden aus den erzeugten Einflussflächen zwei repräsentative Verläufe der Ordinatenwerte der Einflussflächen in Tragwerkslängsrichtung ausgewählt. Die Verläufe wurden dabei für die Mitte der beiden auf dem realen Bauwerk abmarkierten Fahrstreifen erzeugt. In nachfolgender Abbildung 59 ist dies exemplarisch für die Einflussfläche der Messstelle „MQ_3_Ms_U_Re_Int_u“ (vgl. Abbildung 9 und Abbildung 47) dargestellt.

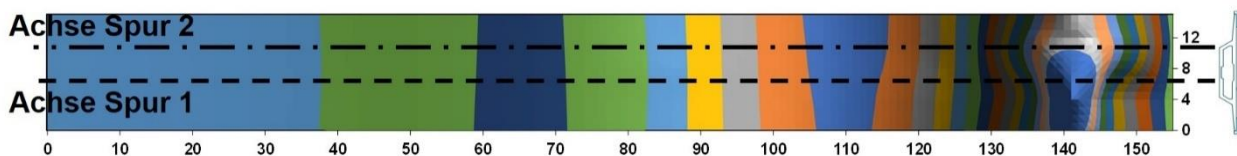


Abbildung 59: Einflussfläche für Kennwert „MQ_3_Ms_U_Re_Int_u“ mit eingetragenen Achsen der Fahrstreifen

Die folgenden Absätze enthalten Diagramme der Verläufe für das ungeschädigte System sowie für die drei Schädigungsszenarien. Für die Messstellen mit Dehnungsmessungen wird jeweils ein Diagramm für Spur 1 und für Spur 2 aufgeführt. Für die Neigungen und die Verschiebungen wird nur ein Diagramm dargestellt, da hier die Einflussflächen entsprechend den Erläuterungen in Absatz 5.1.2 keine veränderliche Form in Querrichtung aufweisen.

Zur übersichtlichen Darstellung der identifizierten Auswirkungen der betrachteten Schädigungsszenarien in Abhängigkeit von Messstelle und Messquerschnitt ist in Absatz 5.3.2.6 eine tabellarische Zusammenfassung mit einer qualitativen Einordnung gegeben.

5.3.2.1. Messquerschnitt 1

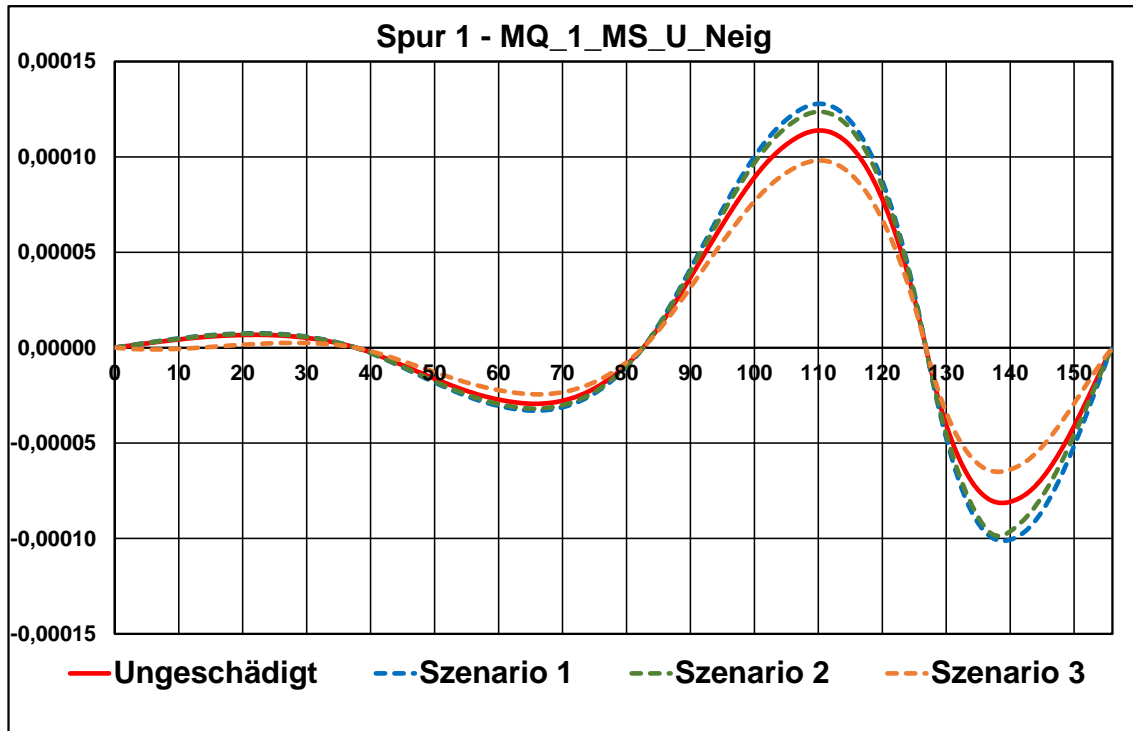


Abbildung 60: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 1 – Messung Neigung – Spur 1/2

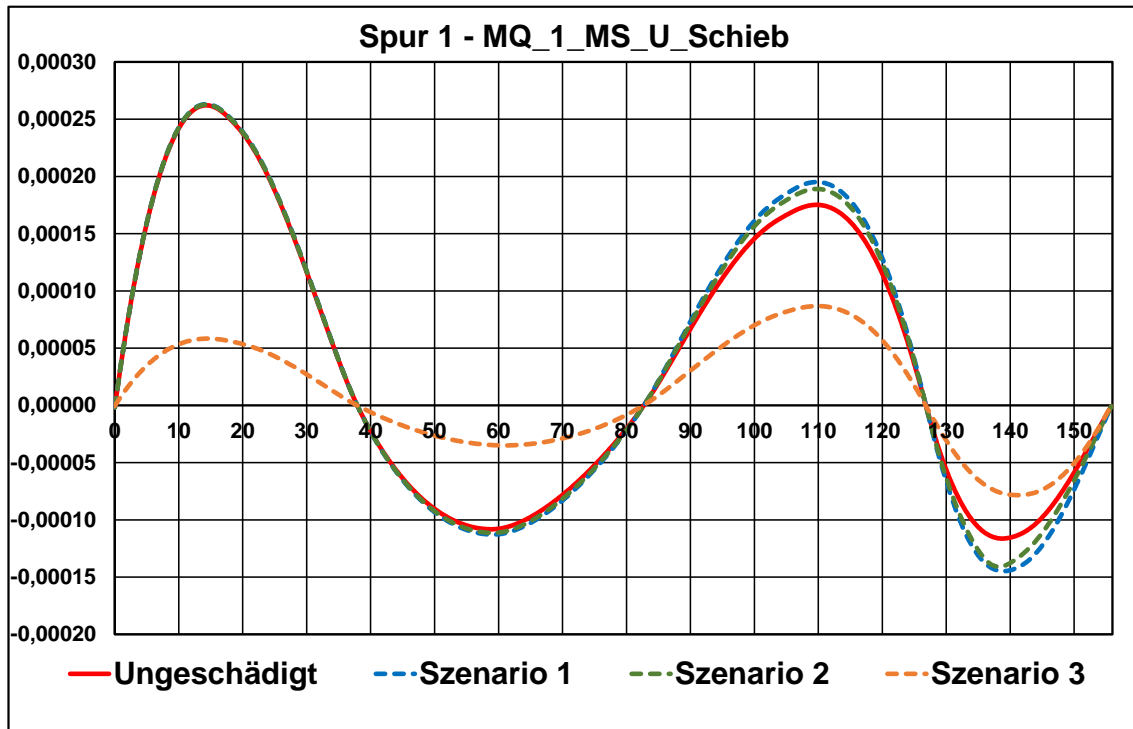


Abbildung 61: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 1 – Messung Verschiebung – Spur 1/2

5.3.2.2. Messquerschnitt 2

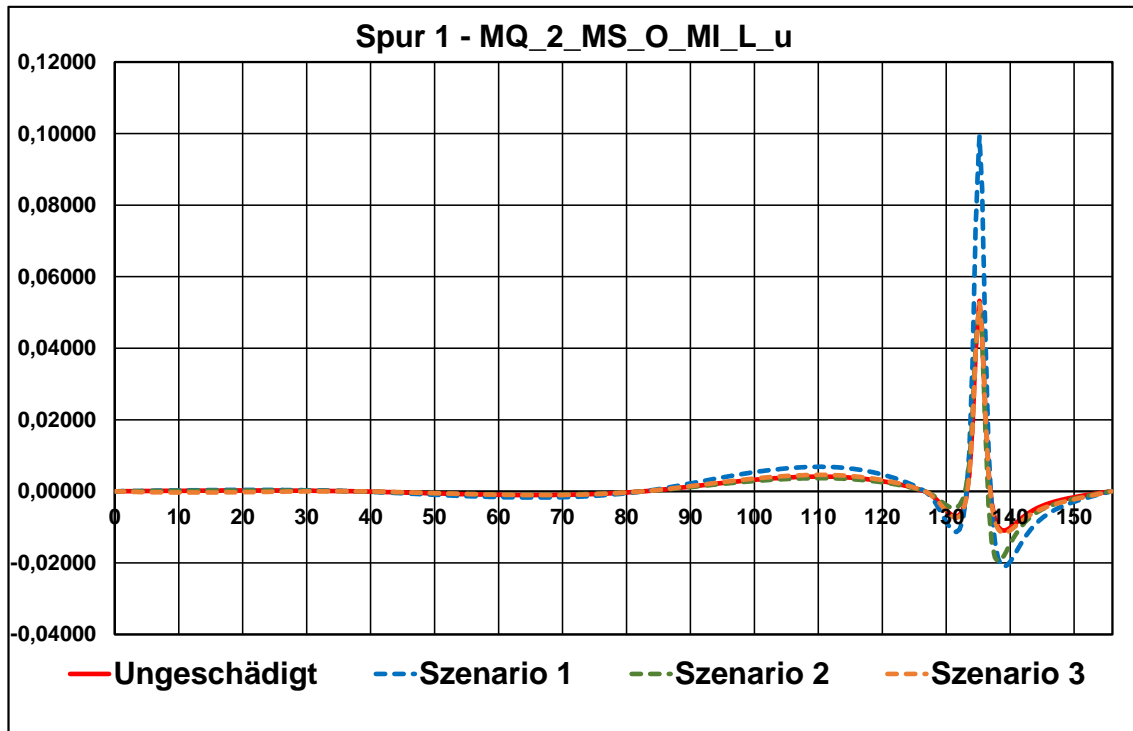


Abbildung 62: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 2 – Messung Dehnung oben–Spur 1

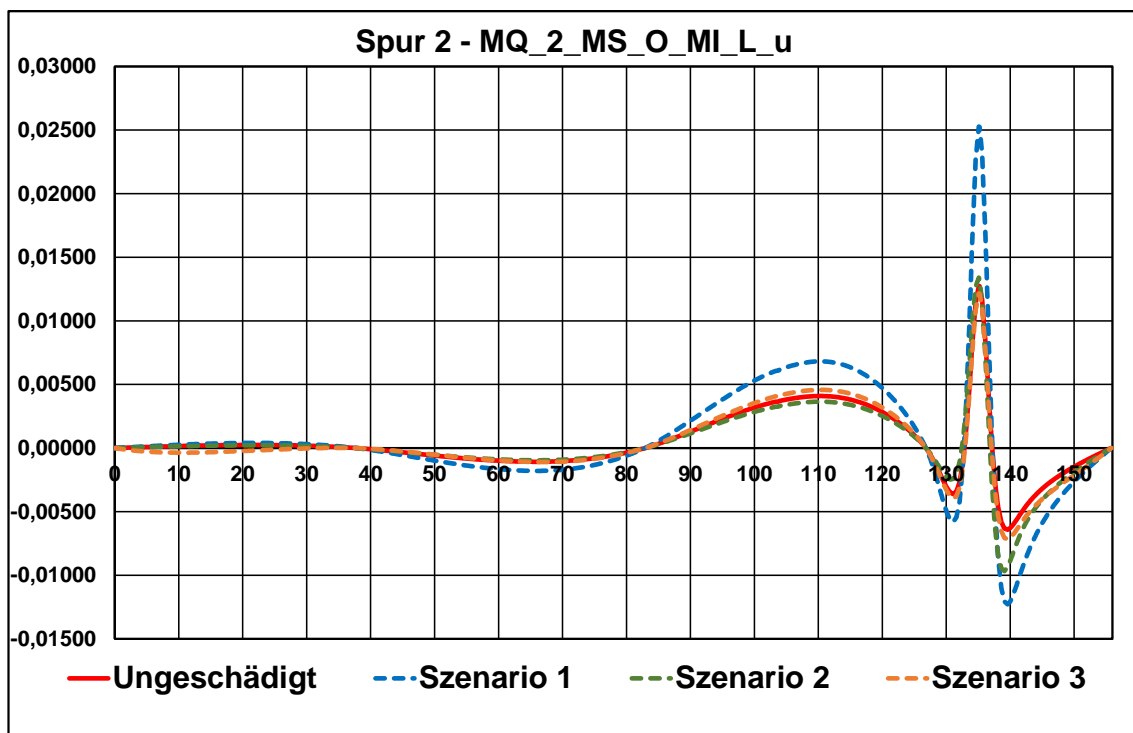


Abbildung 63: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 2 – Messung Dehnung oben–Spur 2

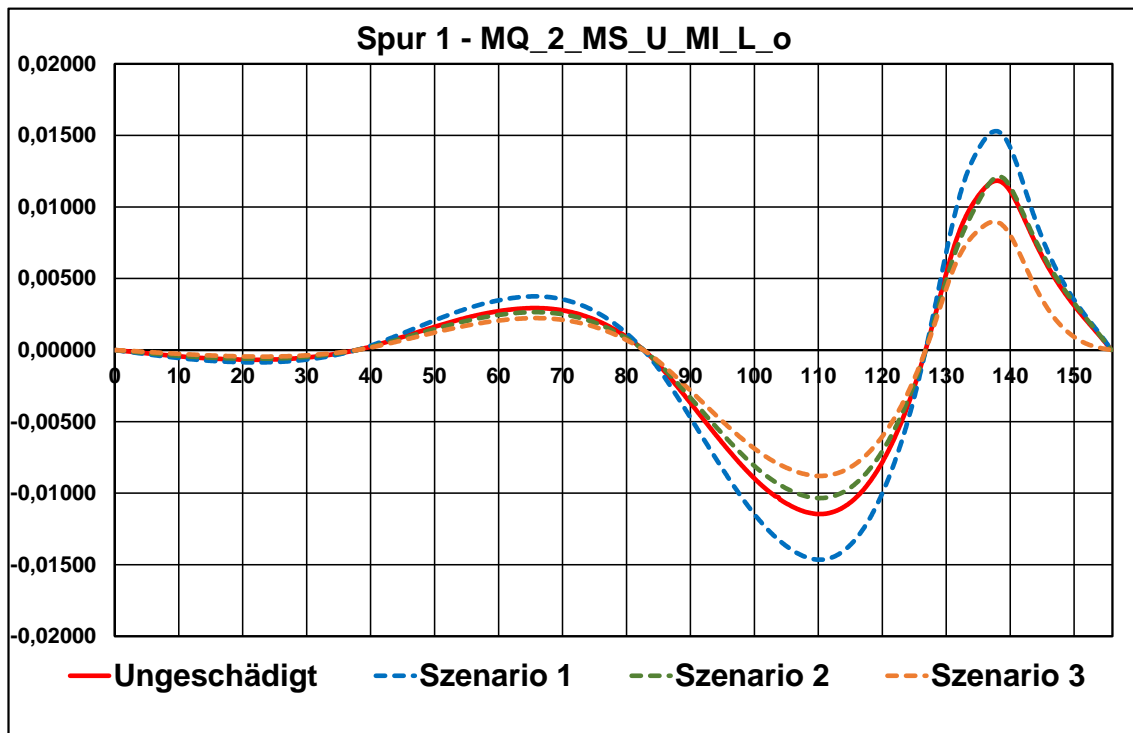


Abbildung 64: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 2 – Messung Dehnung unten – Spur 1

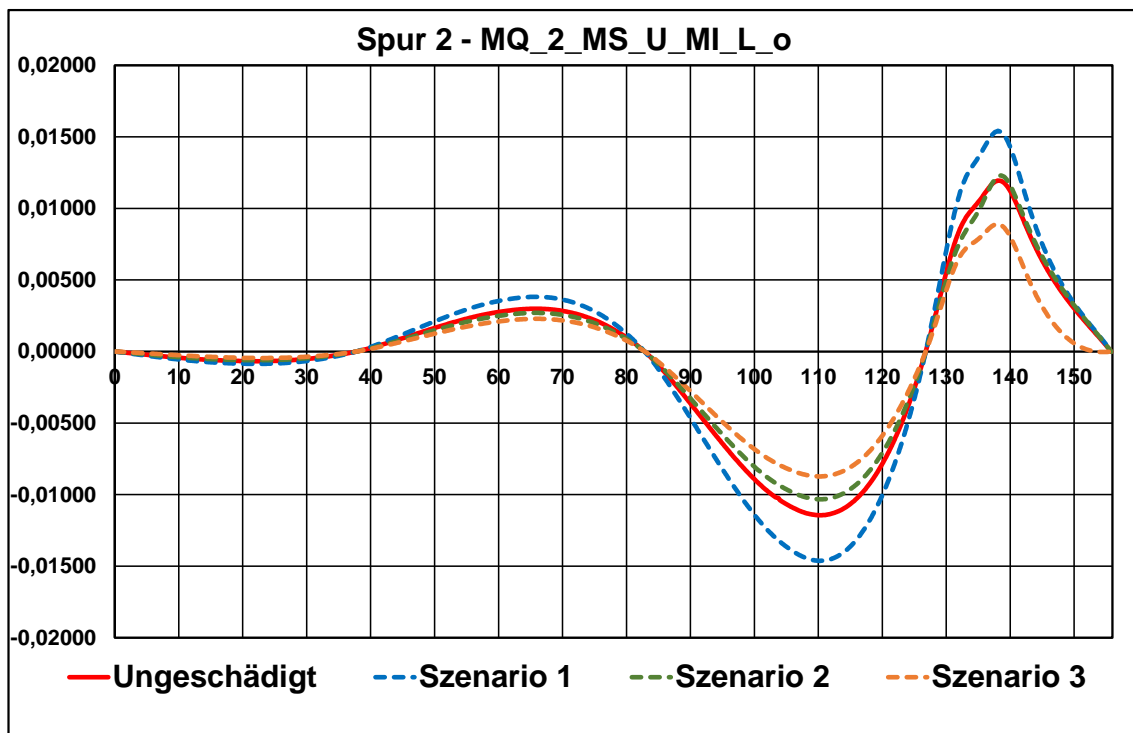


Abbildung 65: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 2 – Messung Dehnung unten – Spur 2

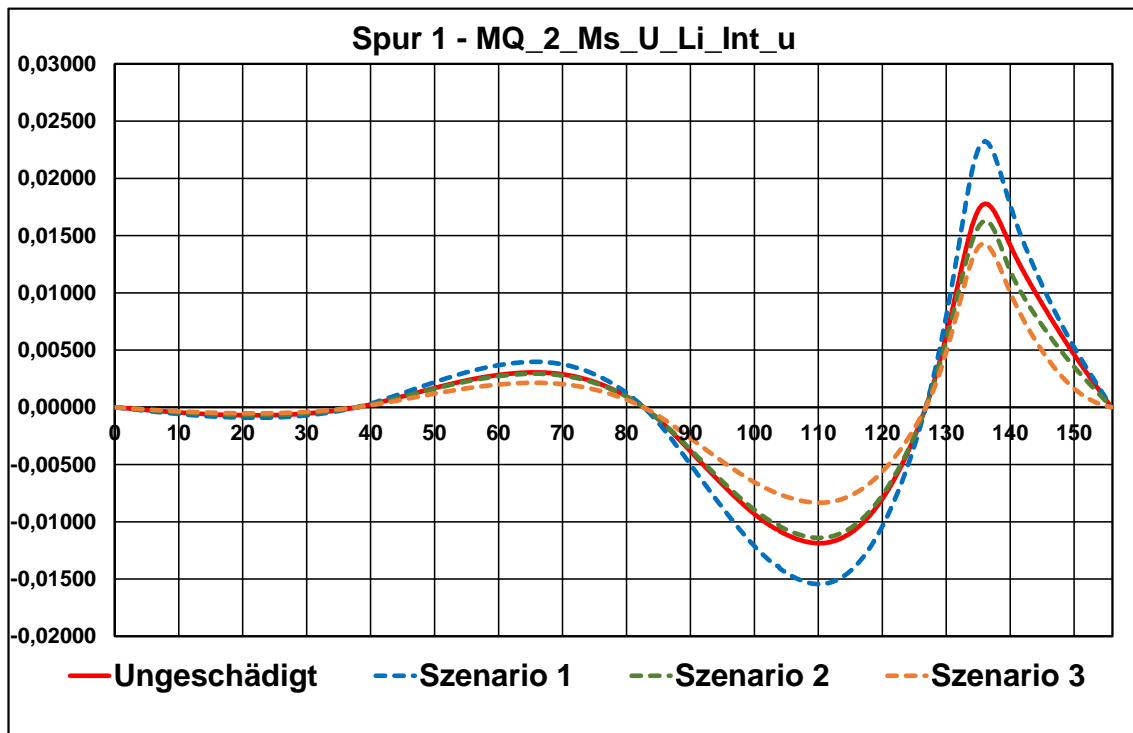


Abbildung 66: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 2 – Messung Dehnung links intern – Spur 1

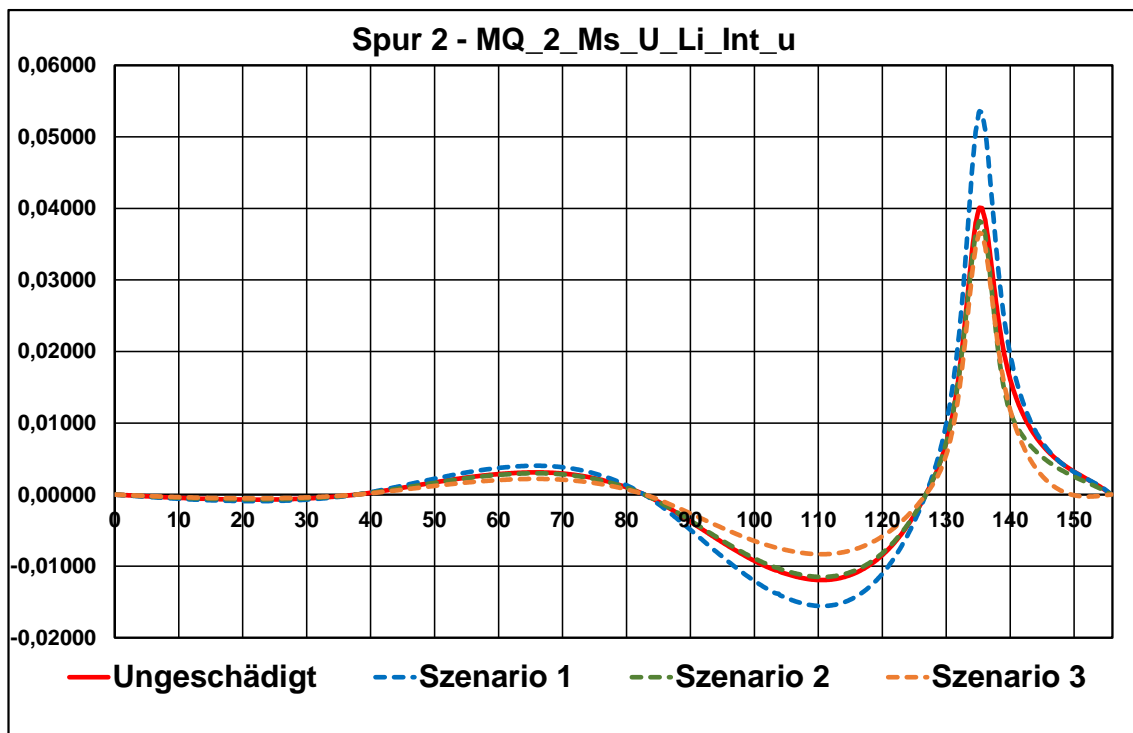


Abbildung 67: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 2 – Messung Dehnung links intern – Spur 2

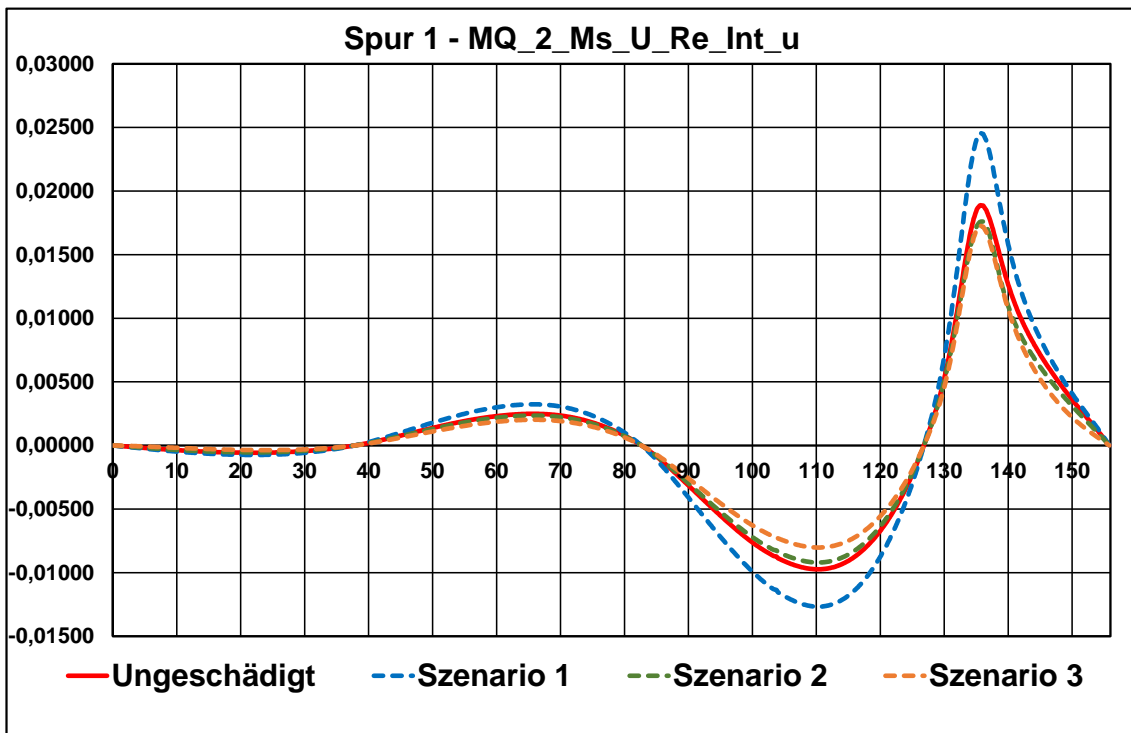


Abbildung 68: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 2 – Messung Dehnung recht intern – Spur 1

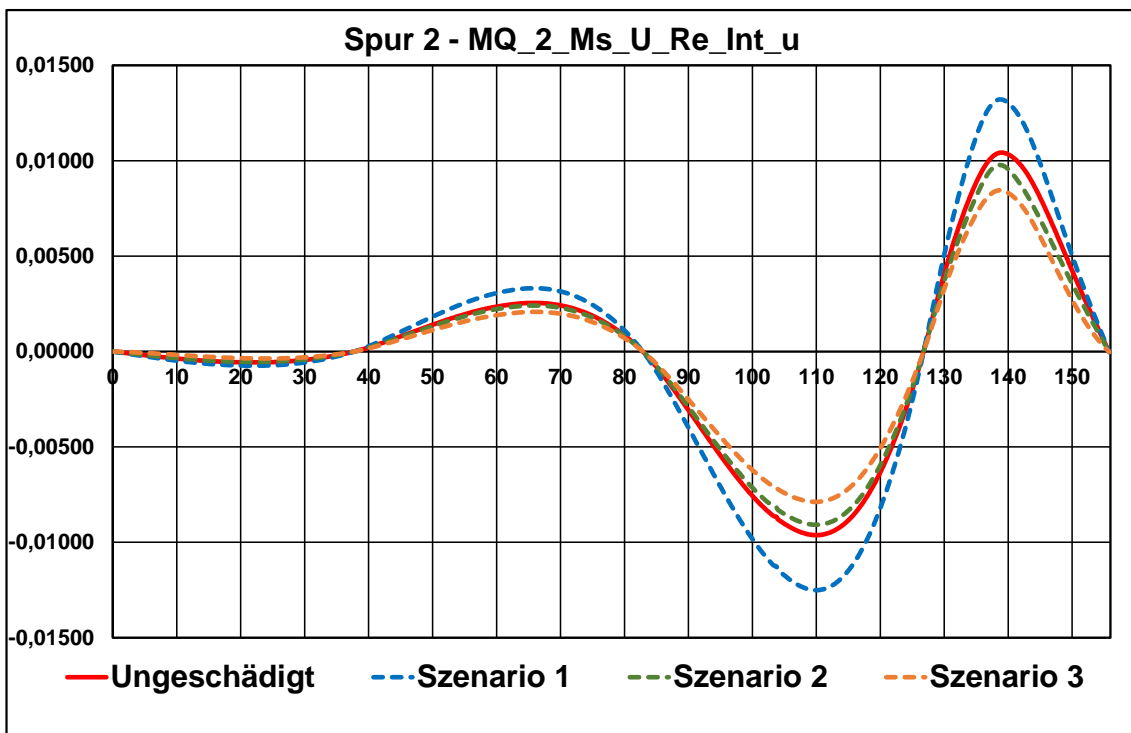


Abbildung 69: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 2 – Messung Dehnung recht intern – Spur 2

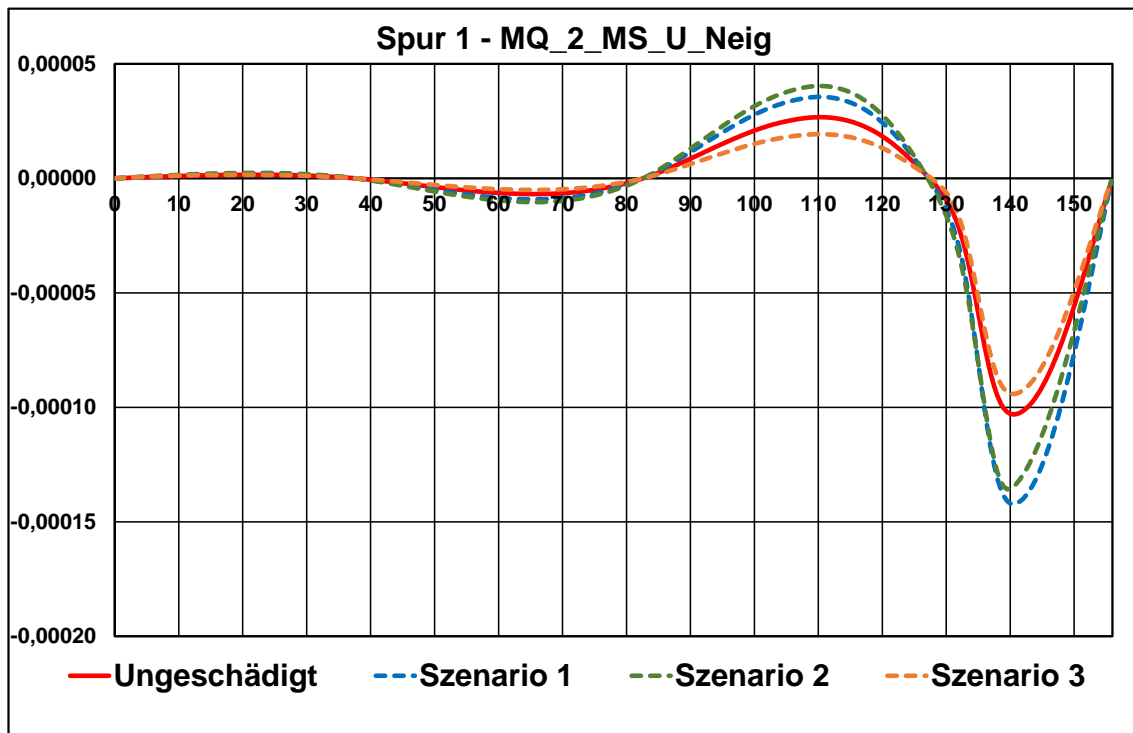


Abbildung 70: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 2 – Messung Neigung – Spur 1/2

5.3.2.3. Messquerschnitt 3

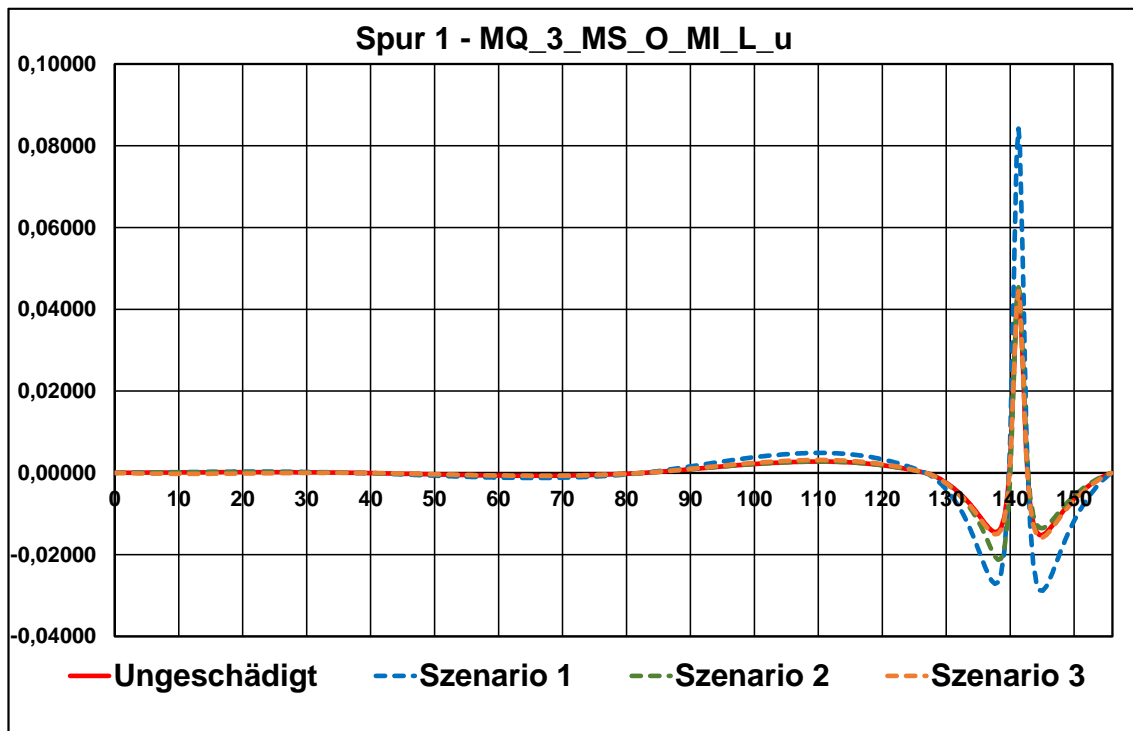


Abbildung 71: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 3 – Messung Dehnung oben–Spur 1

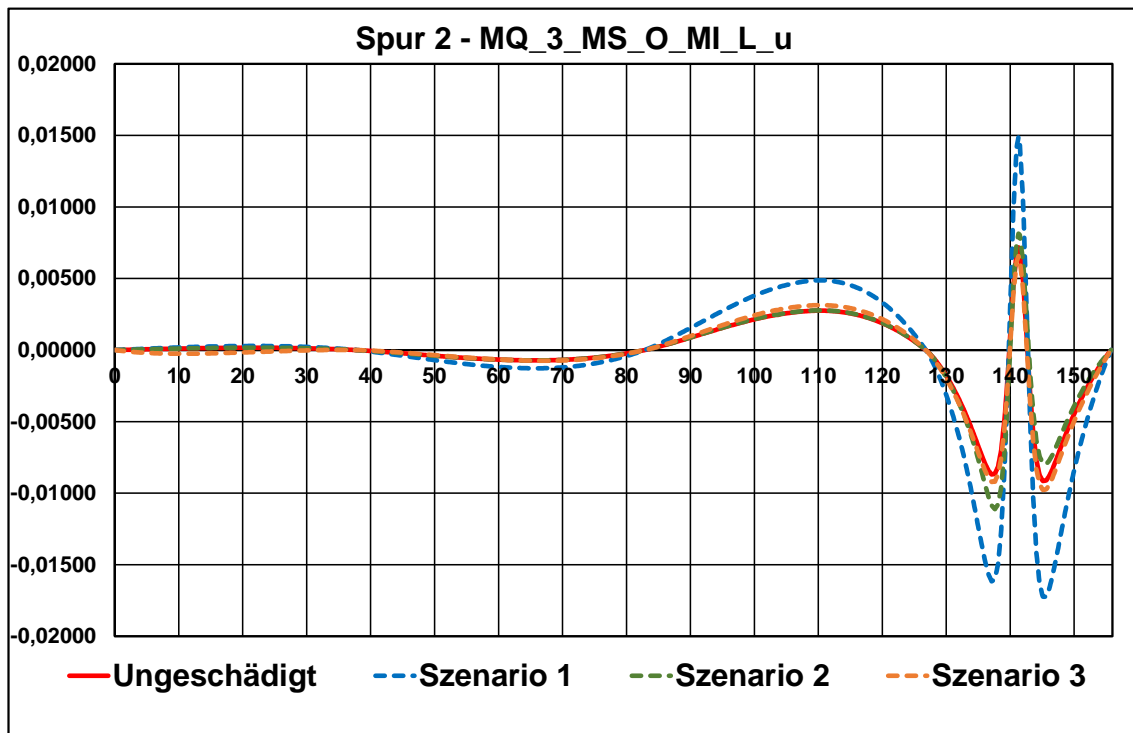


Abbildung 72: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 3 – Messung Dehnung oben – Spur 2

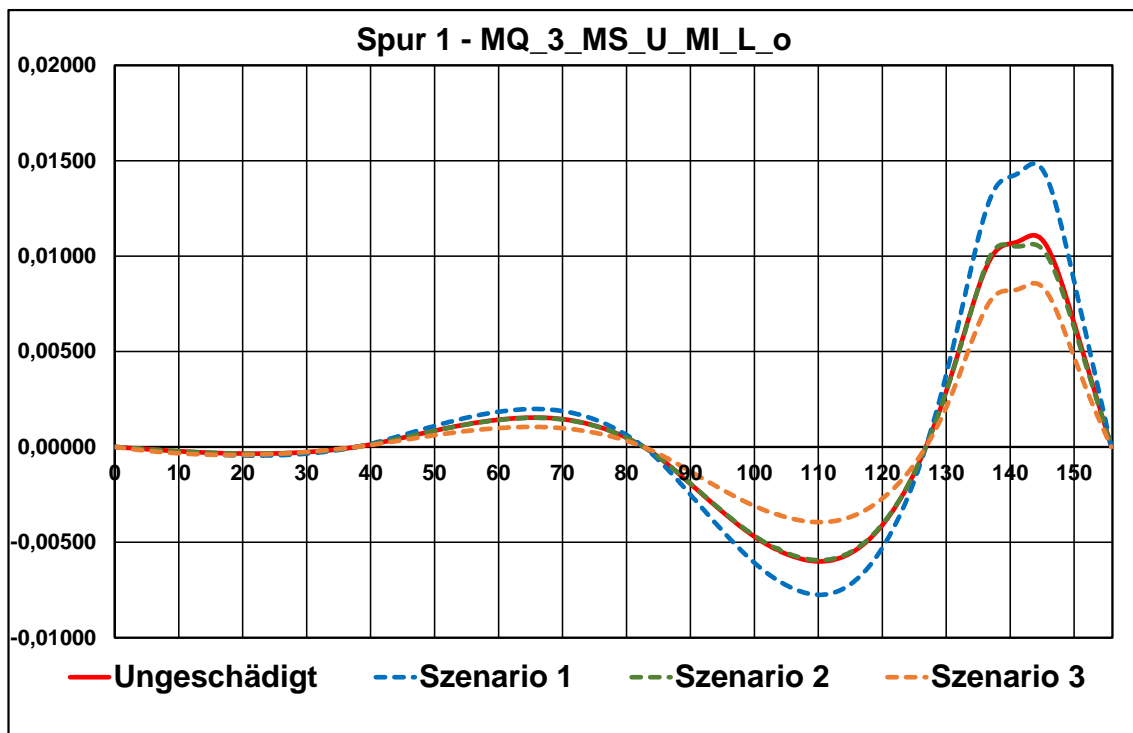


Abbildung 73: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 3 – Messung Dehnung unten – Spur 1

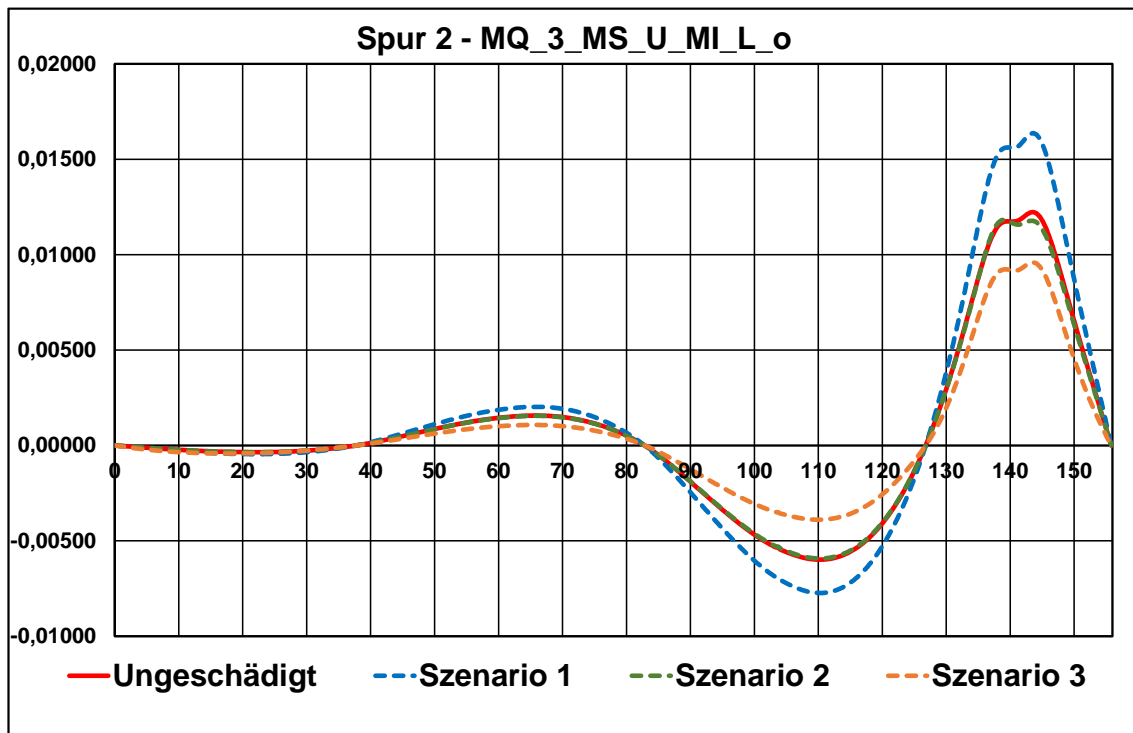


Abbildung 74: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 3 – Messung Dehnung unten – Spur 2

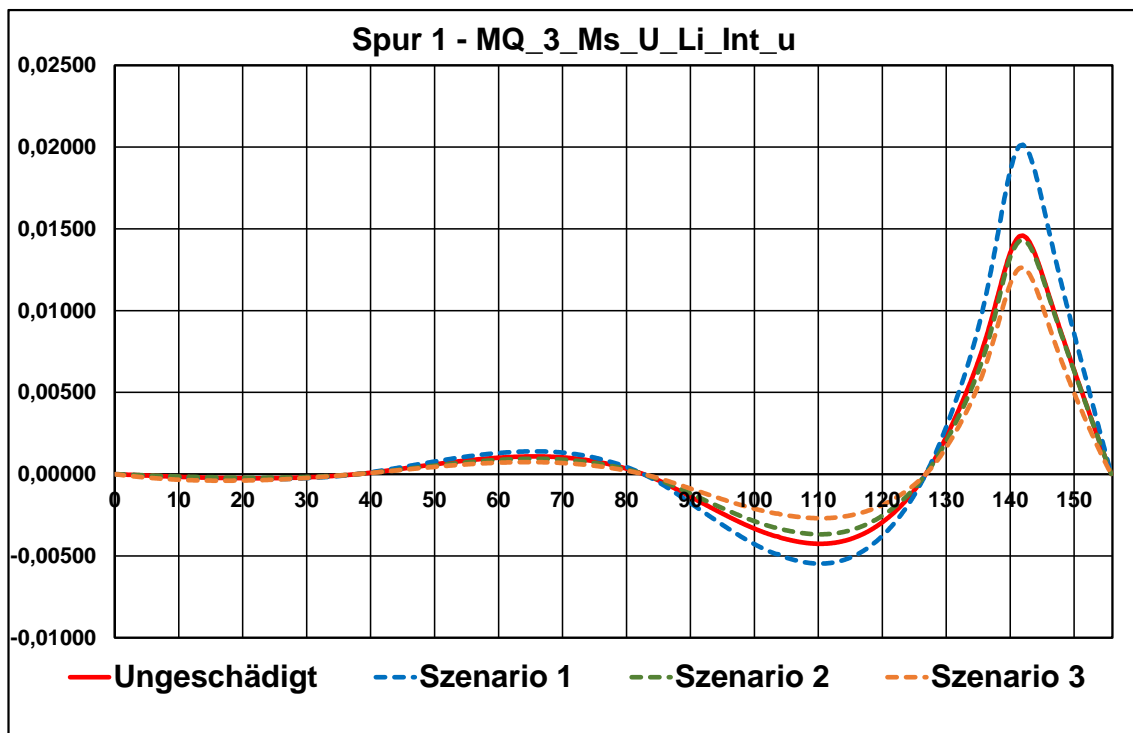


Abbildung 75: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 3 – Messung Dehnung links intern – Spur 1

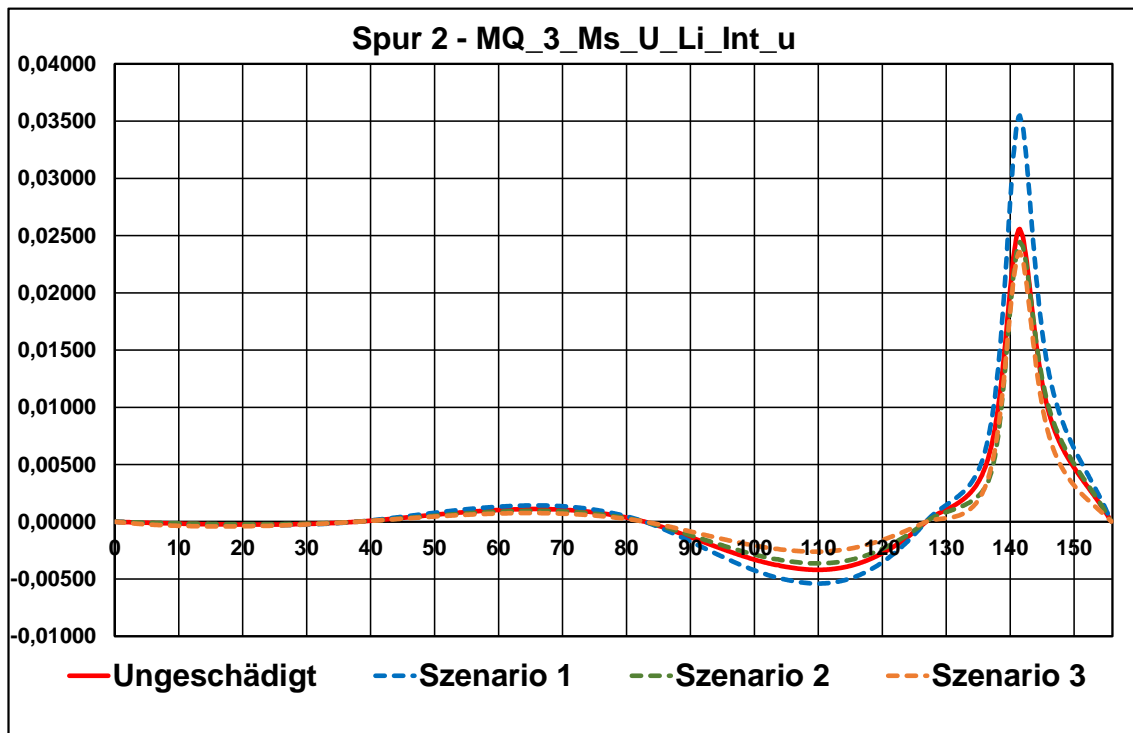


Abbildung 76: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 3 – Messung Dehnung links intern – Spur 2

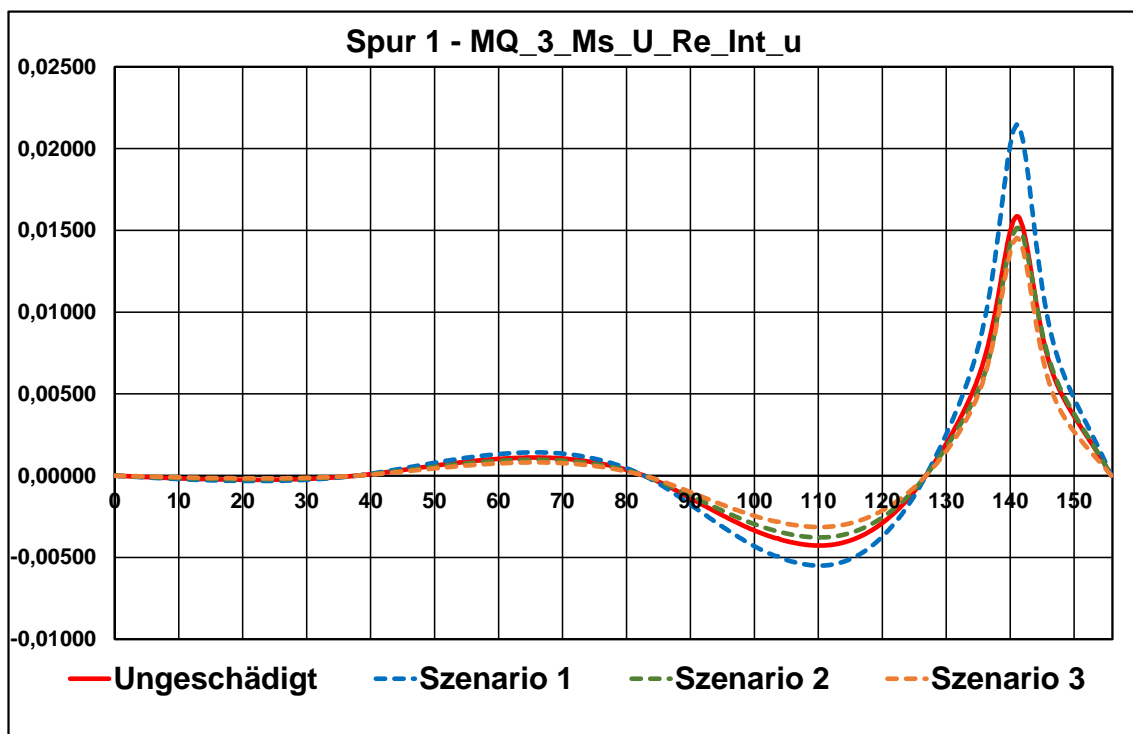


Abbildung 77: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 3 – Messung Dehnung recht intern – Spur 1

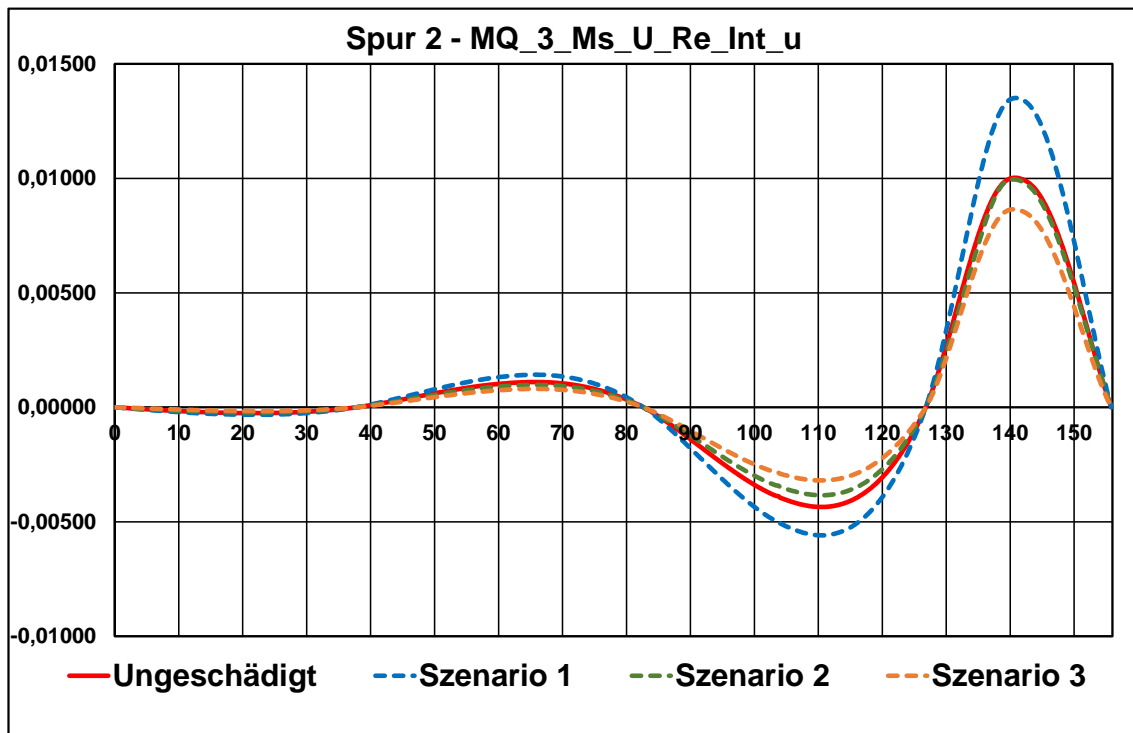


Abbildung 78: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 3 – Messung Dehnung recht intern – Spur 2

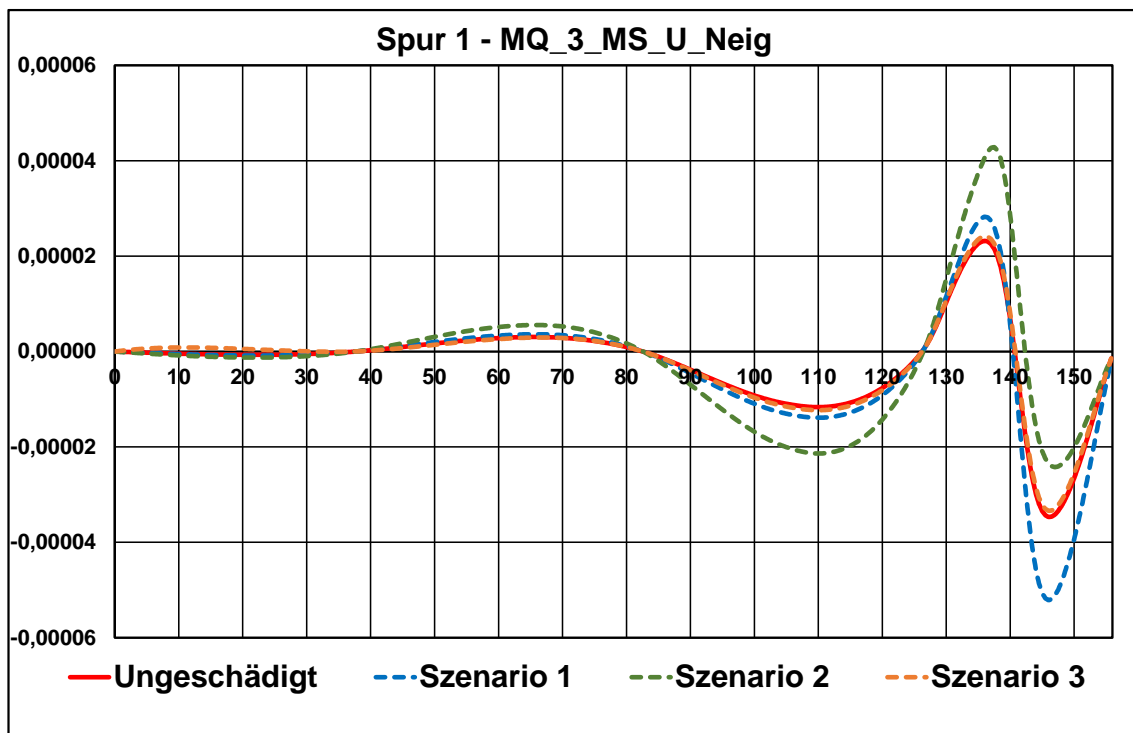


Abbildung 79: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 3 – Messung Neigung – Spur 1/2

5.3.2.4. Messquerschnitt 4

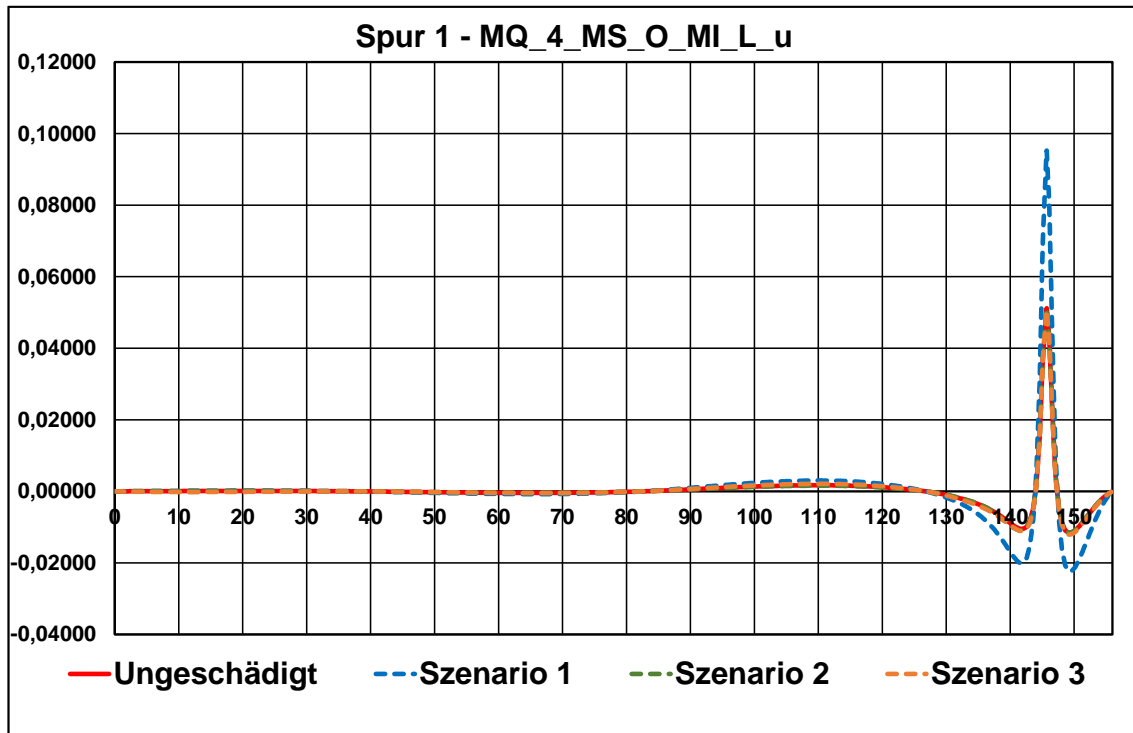


Abbildung 80: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 4 – Messung Dehnung oben–Spur 1

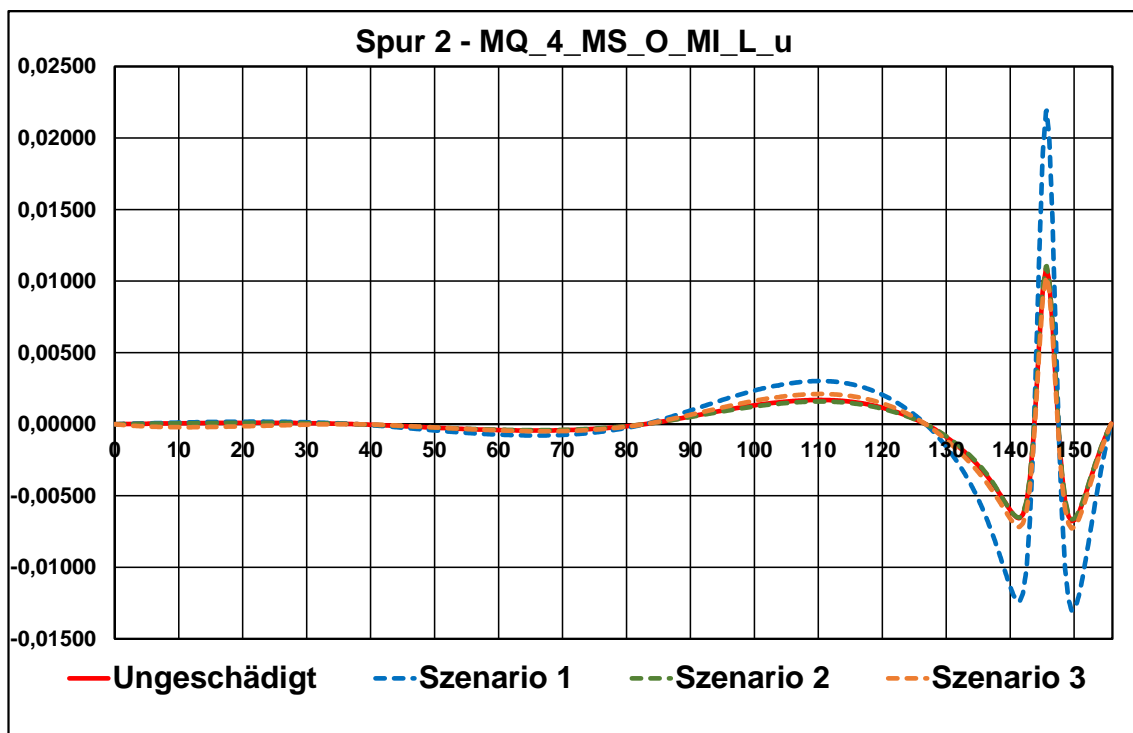


Abbildung 81: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 4 – Messung Dehnung oben–Spur 2

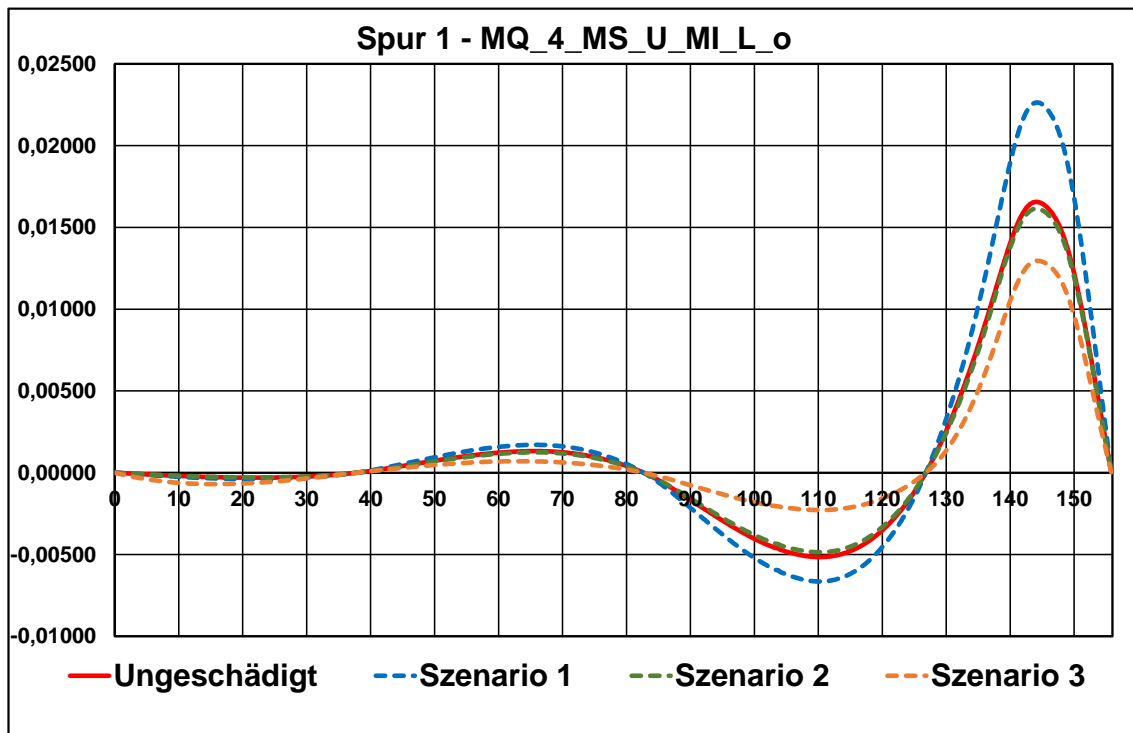


Abbildung 82: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 4 – Messung Dehnung unten – Spur 1

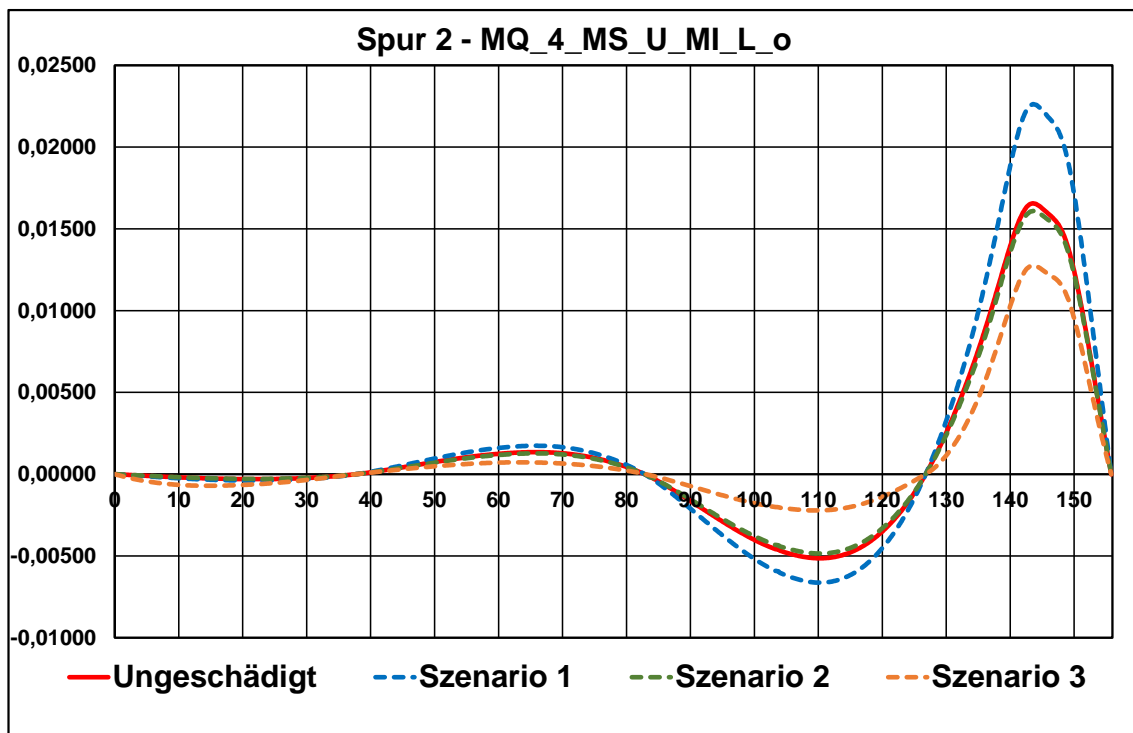


Abbildung 83: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 4 – Messung Dehnung unten – Spur 2

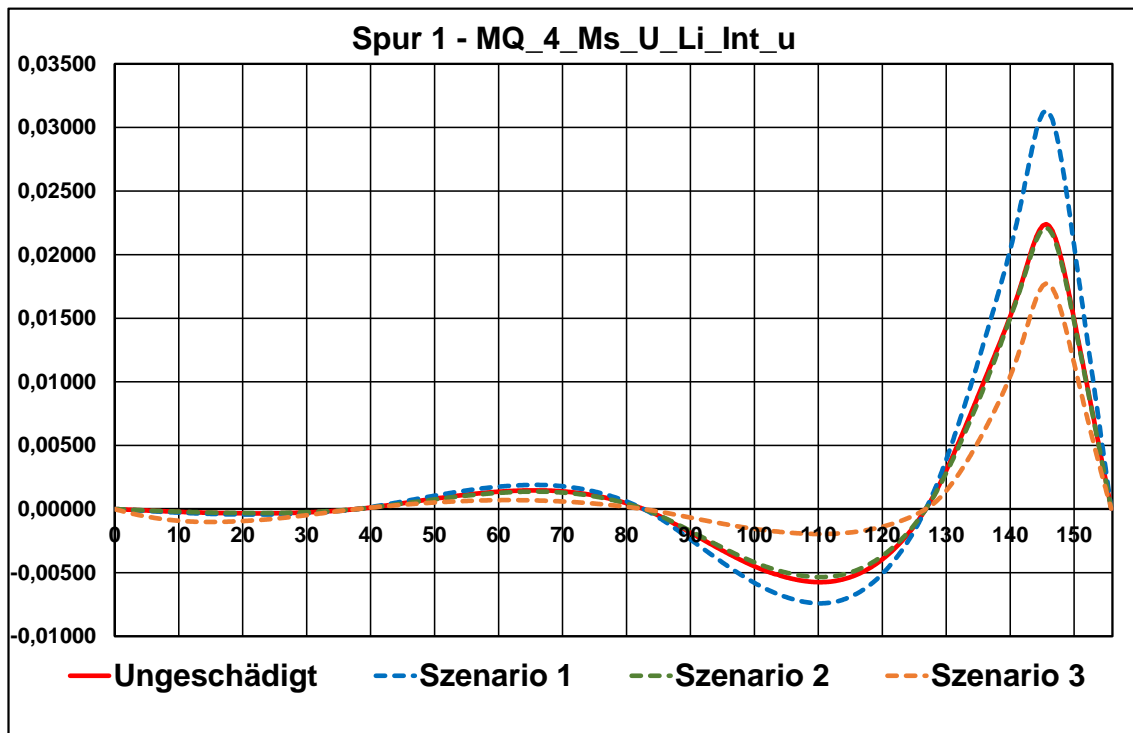


Abbildung 84: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 4 – Messung Dehnung links intern – Spur 1

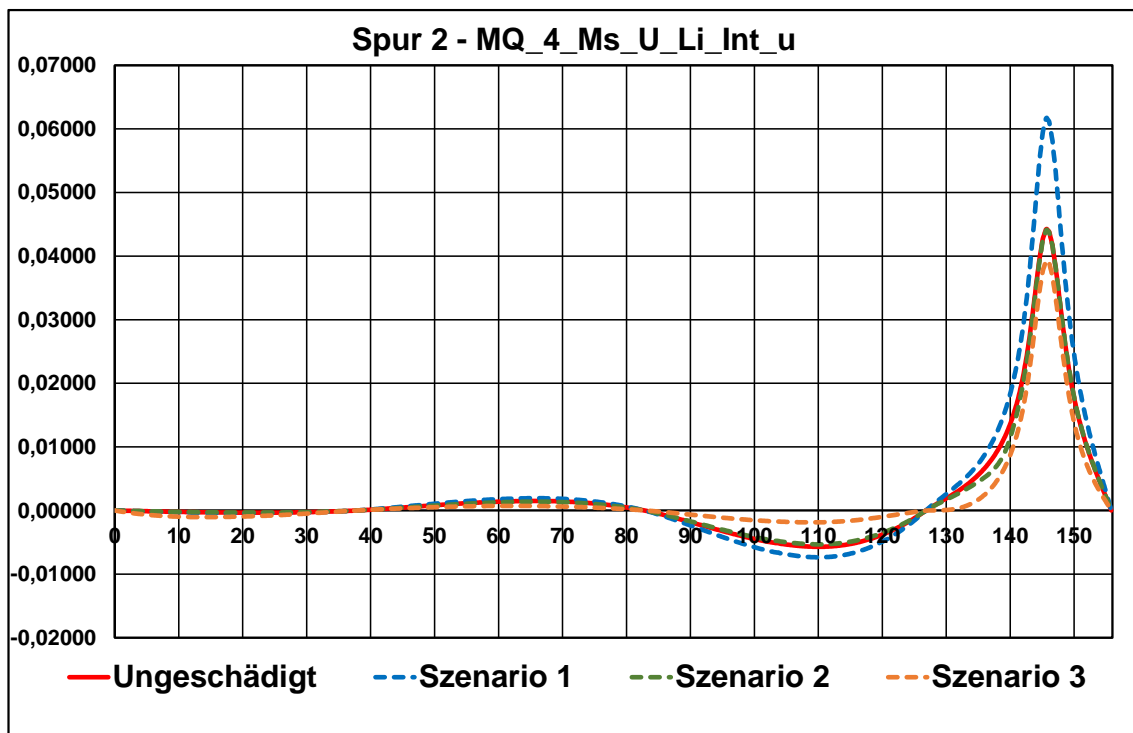


Abbildung 85: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 4 – Messung Dehnung links intern – Spur 2

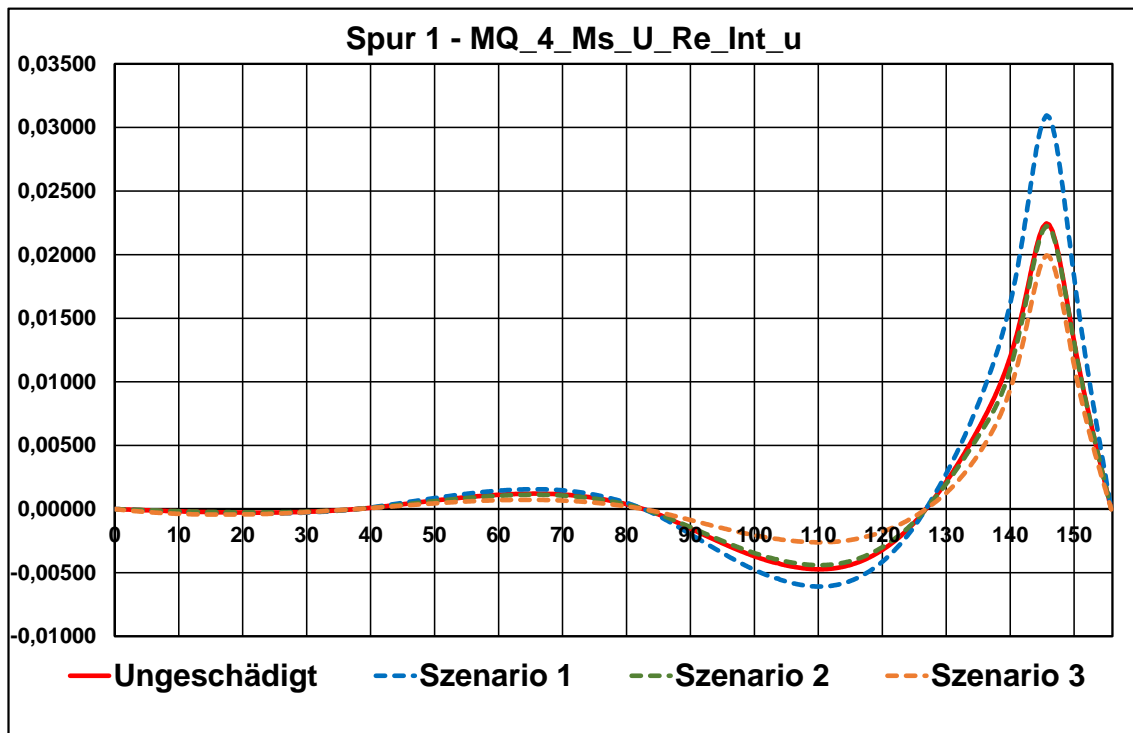


Abbildung 86: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 4 – Messung Dehnung recht intern – Spur 1

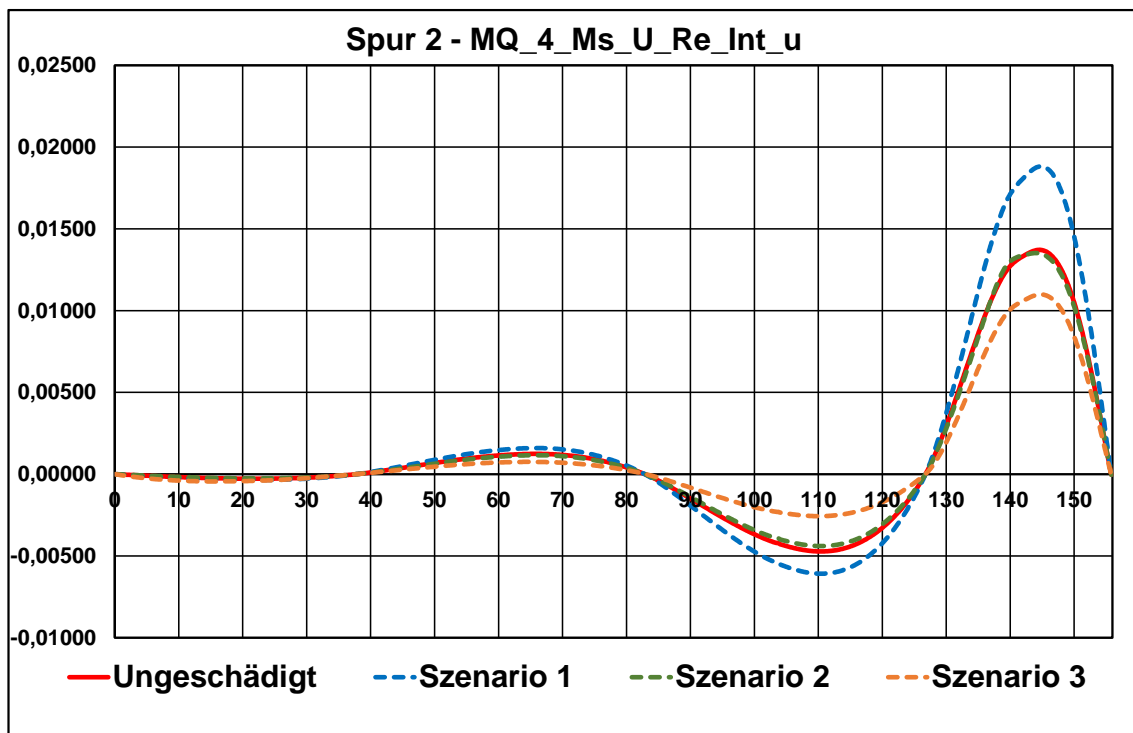


Abbildung 87: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 4 – Messung Dehnung recht intern – Spur 2

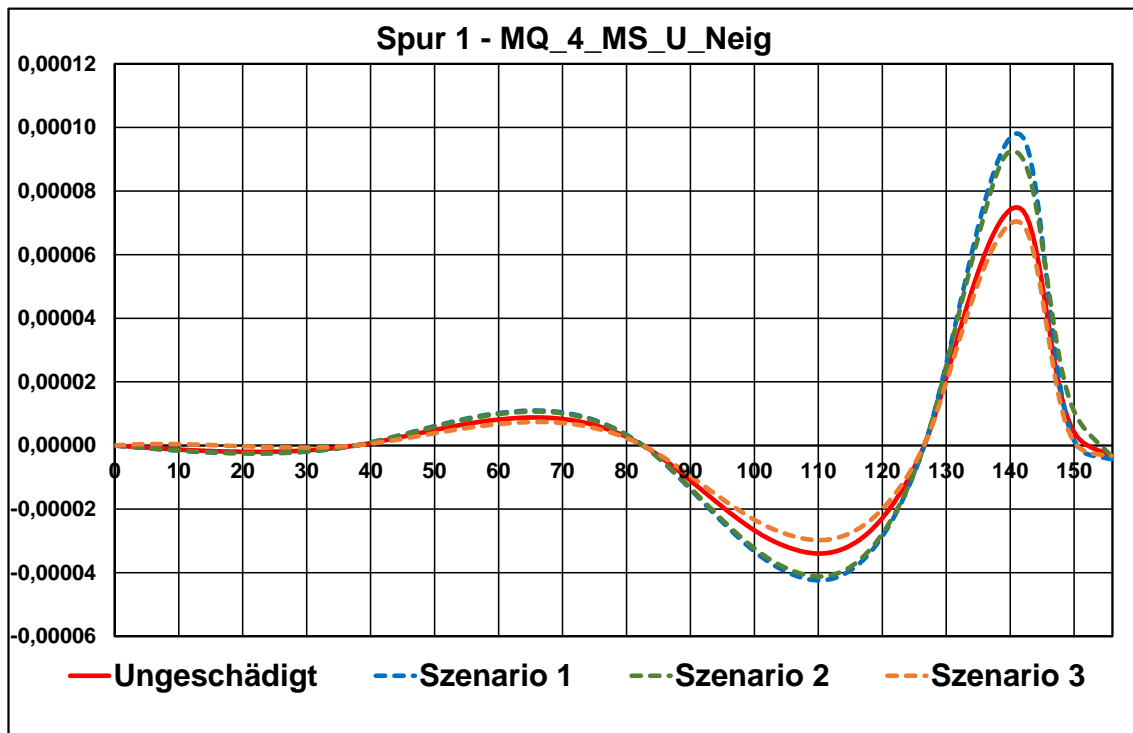


Abbildung 88: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 4 – Messung Neigung – Spur 1/2

5.3.2.5. Messquerschnitt 5

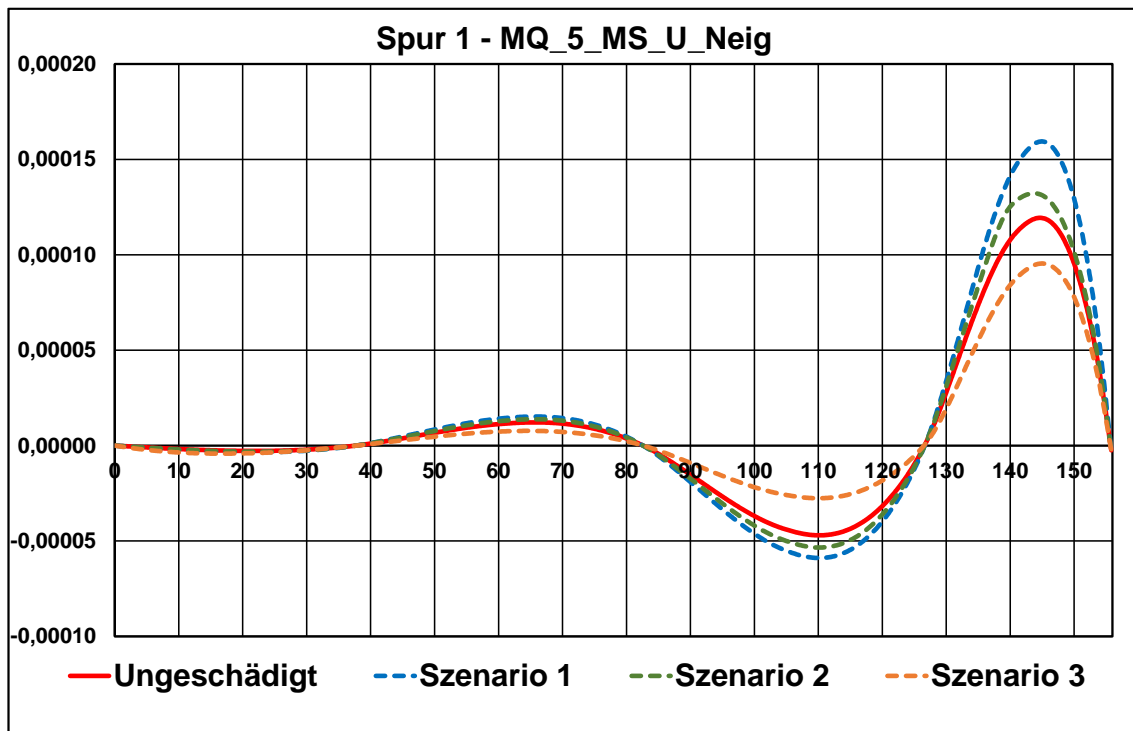


Abbildung 89: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 1 – Messung Neigung – Spur 1/2

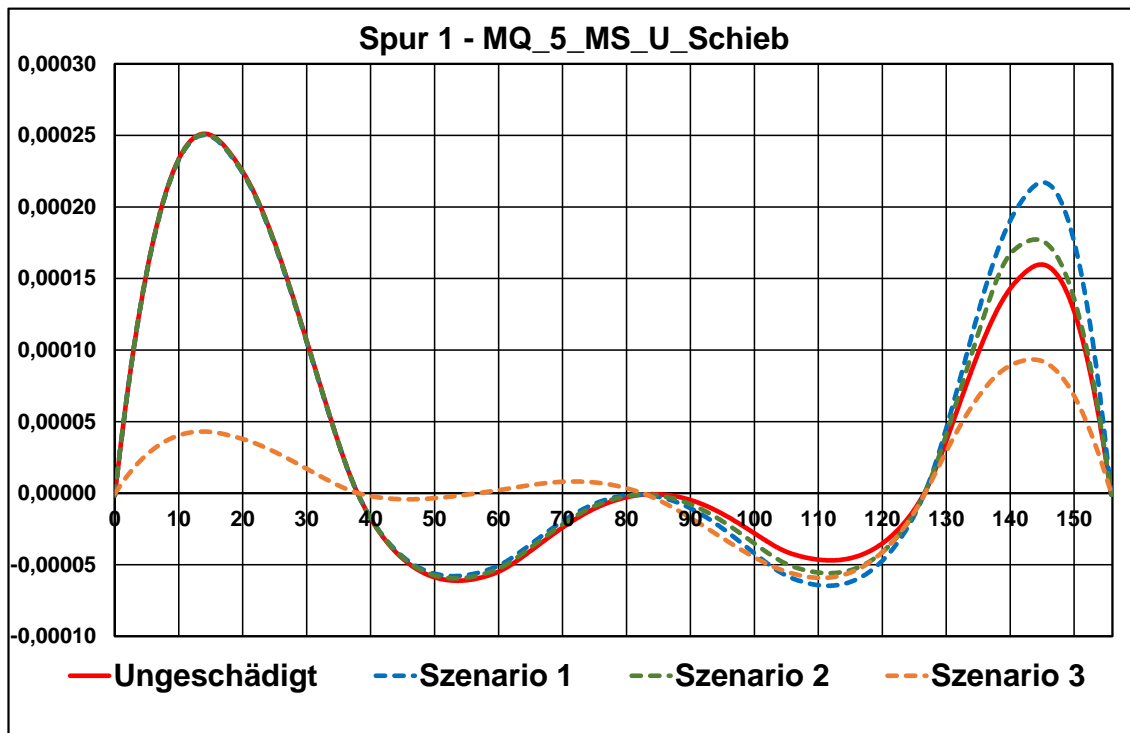


Abbildung 90: Auswirkungen Schädigungsszenarien – Messquerschnitt 1 – Messung Verschiebung – Spur 1/2

5.3.2.6. Zusammenfassung

In nachfolgender Tabelle 5 sind anhand der in den vorhergehenden Diagrammen dargestellten Verläufe qualitative Einschätzung der Auswirkungen der betrachteten Schädigungsszenarien zusammengefasst. In den Spalten ist unter den Überschriften „SZ 1“, „SZ 2“ und „SZ 3“ eine Einschätzung der Auswirkung gegenüber dem Ausgangssystem aufgeführt. Je mehr „+“-Zeichen eingetragen sind, desto deutlicher ist die Auswirkung. Zeigt sich keine signifikante Auswirkung, so ist ein „o“ eingetragen. Zusätzlich ist in der Spalte mit der Überschrift „SZ 1 zu SZ 2“ eine Einschätzung des Vergleiches zwischen SZ 1 und SZ 2 gegeben. Hintergrund ist, dass an einigen Messstellen zwar ein deutlicher Unterschied infolge SZ 1 bzw. SZ 2 zum Ausgangssystem vorliegt, zwischen SZ 1 und SZ 2 aber kein deutlicher unterschied vorhanden ist. Entsprechend folgt in der Tabelle ein Eintrag von „+“-Zeichen bzw. dem Zeichen „o“.

Tabelle 5: Einschätzung der Auswirkungen der Schädigungsszenarien zum Ausgangssystem

Messquer-schnitt	Messstelle	SZ 1	SZ 2	SZ 1 zu SZ 2	SZ 3
MQ 1	MQ_1_MS_U_Neig	+	+	o	+
	MQ_1_MS_U_Schieb	+	+	o	+++
MQ 2	MQ_2_MS_O_MI_L_u	++	+	+	o
	MQ_2_MS_U_MI_L_o	++	o	+	+
	MQ_2_Ms_U_Li_Int_u	++	o	+	+
	MQ_2_Ms_U_Re_Int_u	++	o	+	+
	MQ_2_MS_U_Neig	++	++	o	+
MQ 3	MQ_3_MS_O_MI_L_u	++	+	+	o
	MQ_3_MS_U_MI_L_o	++	o	+	++
	MQ_3_Ms_U_Li_Int_u	++	o	+	o
	MQ_3_Ms_U_Re_Int_u	++	o	+	+
	MQ_3_MS_U_Neig	+	++	+	o
MQ 4	MQ_4_MS_O_MI_L_u	++	o	++	o
	MQ_4_MS_U_MI_L_o	++	o	+	++
	MQ_4_Ms_U_Li_Int_u	++	o	+	+
	MQ_4_Ms_U_Re_Int_u	++	o	+	++
	MQ_4_MS_U_Neig	++	++	o	o
MQ 5	MQ_5_MS_U_Neig	++	+	+	++
	MQ_5_MS_U_Schieb	++	+	+	+++

5.3.3. Temperaturbeanspruchungen

Auf der nachfolgenden Seite sind in Tabelle 6 die ermittelten Kennwerte für Einheits-Temperaturbeanspruchungen aus dem Ausgangssystem (Werte analog zu Tabelle 4 – Bezeichnung „SZ 0“) sowie aus den Systemen mit den betrachteten Schädigungsszenarien zusammengestellt.

Es wird ersichtlich, dass die Werte für SZ 3 in nahezu allen Messstellen um Größenordnungen anders sind als für das Ausgangssystem oder die Schädigungsszenarien SZ 1 bzw. SZ 2. Die Einführung einer deutlichen Versteifung der horizontalen Bewegungsmöglichkeit an den Lagerungen an Achse 40 und 50 in einer der beiden Lagerreihen lässt diese Änderungen auch erwarten.

Tabelle 6: Kennwerte für Einheits-Temperaturbeanspruchungen - Schädigungsszenarien

Messstelle	SZ	Faktor für ΔT_N	Faktor für $\Delta T_{M,z}$ (vertikal)	Faktor für $\Delta T_{M,y}$ (horizontal)	Einheit
MQ_1_MS_U_Neig	0	$-5,778 \cdot 10^{-10}$	$-9,014 \cdot 10^{-6}$	$-1,319 \cdot 10^{-16}$	rad
	1	$-7,755 \cdot 10^{-10}$	$-4,125 \cdot 10^{-6}$	$-1,300 \cdot 10^{-16}$	
	2	$-7,819 \cdot 10^{-10}$	$-5,592 \cdot 10^{-6}$	$5,014 \cdot 10^{-16}$	
	3	$-2,736 \cdot 10^{-6}$	$-5,973 \cdot 10^{-6}$	$4,226 \cdot 10^{-7}$	
MQ_1_MS_U_Schieb	0	$1,268 \cdot 10^{-3}$	$5,881 \cdot 10^{-5}$	$-1,203 \cdot 10^{-4}$	m
	1	$1,268 \cdot 10^{-3}$	$5,909 \cdot 10^{-5}$	$-1,203 \cdot 10^{-4}$	
	2	$1,268 \cdot 10^{-3}$	$5,900 \cdot 10^{-5}$	$-1,203 \cdot 10^{-4}$	
	3	$2,189 \cdot 10^{-4}$	$7,263 \cdot 10^{-6}$	$4,172 \cdot 10^{-5}$	
MQ_2_MS_U_Neig	0	$-7,923 \cdot 10^{-10}$	$-1,017 \cdot 10^{-5}$	$-3,432 \cdot 10^{-17}$	rad
	1	$-1,062 \cdot 10^{-9}$	$-6,454 \cdot 10^{-6}$	$-4,092 \cdot 10^{-17}$	
	2	$-1,112 \cdot 10^{-9}$	$-4,824 \cdot 10^{-6}$	$1,823 \cdot 10^{-16}$	
	3	$1,323 \cdot 10^{-5}$	$-7,789 \cdot 10^{-6}$	$-2,043 \cdot 10^{-6}$	
MQ_3_MS_U_Neig	0	$1,858 \cdot 10^{-10}$	$-5,005 \cdot 10^{-6}$	$1,643 \cdot 10^{-17}$	rad
	1	$2,495 \cdot 10^{-10}$	$-5,825 \cdot 10^{-6}$	$1,679 \cdot 10^{-17}$	
	2	$4,003 \cdot 10^{-10}$	$-8,419 \cdot 10^{-6}$	$-9,721 \cdot 10^{-17}$	
	3	$1,117 \cdot 10^{-5}$	$-4,157 \cdot 10^{-6}$	$-1,725 \cdot 10^{-6}$	
MQ_4_MS_U_Neig	0	$4,935 \cdot 10^{-10}$	$2,154 \cdot 10^{-6}$	$4,163 \cdot 10^{-17}$	rad
	1	$6,462 \cdot 10^{-10}$	$-9,220 \cdot 10^{-7}$	$4,547 \cdot 10^{-17}$	
	2	$6,785 \cdot 10^{-10}$	$-7,655 \cdot 10^{-7}$	$-1,797 \cdot 10^{-6}$	
	3	$2,285 \cdot 10^{-6}$	$1,348 \cdot 10^{-6}$	$-3,528 \cdot 10^{-7}$	
MQ_5_MS_U_Neig	0	$9,946 \cdot 10^{-10}$	$2,869 \cdot 10^{-5}$	$6,608 \cdot 10^{-17}$	rad
	1	$1,320 \cdot 10^{-9}$	$2,342 \cdot 10^{-5}$	$7,339 \cdot 10^{-17}$	
	2	$1,151 \cdot 10^{-9}$	$2,625 \cdot 10^{-5}$	$-2,597 \cdot 10^{-16}$	
	3	$-4,107 \cdot 10^{-5}$	$2,232 \cdot 10^{-5}$	$6,342 \cdot 10^{-6}$	
MQ_5_MS_U_Schieb	0	$1,558 \cdot 10^{-3}$	$5,868 \cdot 10^{-5}$	$-1,203 \cdot 10^{-4}$	m
	1	$1,558 \cdot 10^{-3}$	$5,897 \cdot 10^{-5}$	$-1,203 \cdot 10^{-4}$	
	2	$1,558 \cdot 10^{-3}$	$5,891 \cdot 10^{-5}$	$-1,203 \cdot 10^{-4}$	
	3	$4,136 \cdot 10^{-4}$	$-3,698 \cdot 10^{-6}$	$5,643 \cdot 10^{-5}$	

5.4. Zeitliche Umsetzung der Schädigungsszenarien

In nachfolgender Abbildung 91 ist der Ansatz der beschriebenen Schädigungsszenarien über den Gesamtzeitraum der erzeugten künstlichen Messdaten dargestellt. Es erfolgt zunächst die Generierung von künstlichen Messdaten für das ungeschädigte Tragwerk für einen Gesamtzeitraum von 189 Tagen (27 Wochen). Anschließend erfolgt für einen Gesamtzeitraum von 28 Tagen die Generierung von künstlichen Messdaten für die geschädigten Tragwerke.

In SZ 1 und SZ 3 wird dabei von einer schleichenden Schädigung ausgegangen. Über einen Zeitraum von 21 Tagen nimmt dabei die betrachtete Schädigung von 0 (ungeschädigtes Tragwerk) auf 1 (geschädigtes Tragwerk) zu. Anschließend werden für eine weitere Woche Messdaten unter Ansatz des geschädigten Tragwerkes erzeugt.

In SZ 2 wird von einem plötzlichen Eintritt der Schädigung ausgegangen. Entsprechend wird unmittelbar zu Beginn des genannten 28-Tage-Zeitraumes die volle Schädigung aus SZ 2 für die Erzeugung der künstlichen Messdaten abgesetzt.

Ergänzend werden zu eventuellen Vergleichszwecken für den genannten 28-Tage-Zeitraum künstliche Messdaten für das ungeschädigte Tragwerk generiert. Diese Daten werden nachfolgend mit SZ 0 bezeichnet.

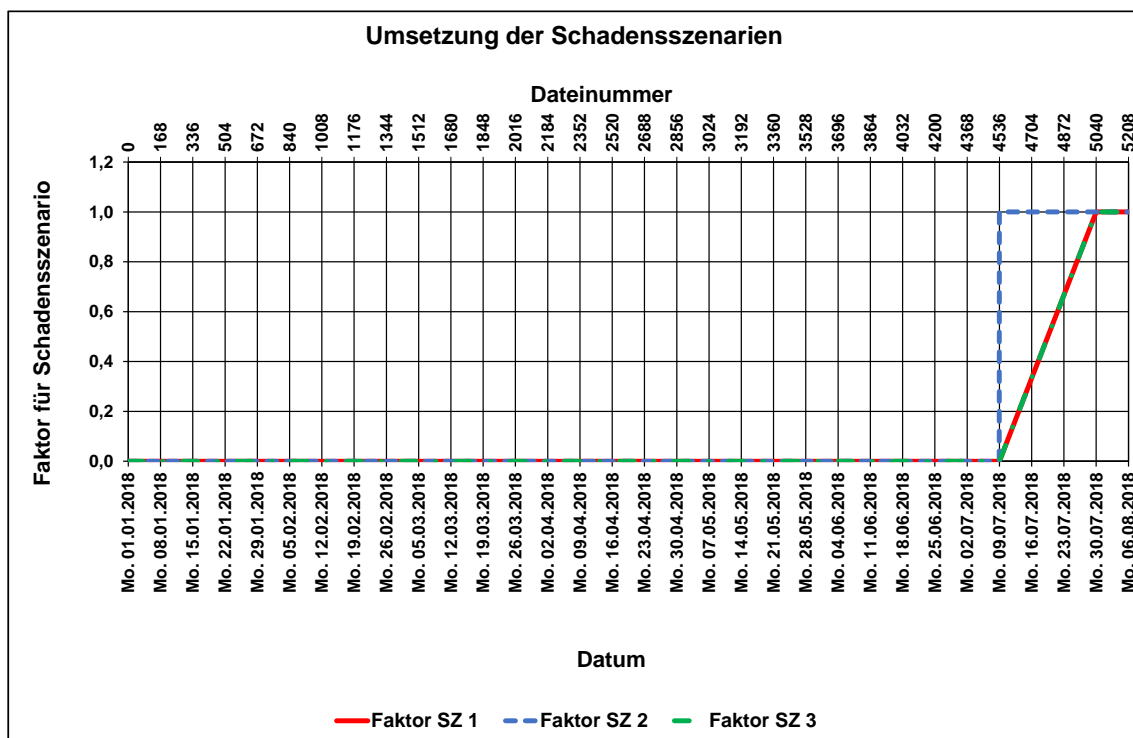


Abbildung 91: Darstellung der Umsetzung der Schädigungsszenarien in den künstlichen Messdaten

6. Dokumentation der erzeugten künstlichen Messdaten

6.1. Daten- und Dateistrukturen

Auf dem übergebenen Datenträger (durch den AG bereitgestellte USB-Festplatte) befindet sich der Ordner „Z1kl_B1_SimuMess_VVo_T6“. Darin sind die erzeugten künstlichen Messdaten enthalten, zusätzliche Excel-Dateien zur Dokumentation der verwendeten Parameter und Eingangsdaten sowie ergänzende Dokumente enthalten. Nachfolgende Abbildung 92 zeigt die Ordnerstruktur des Gesamtdatenträgers.

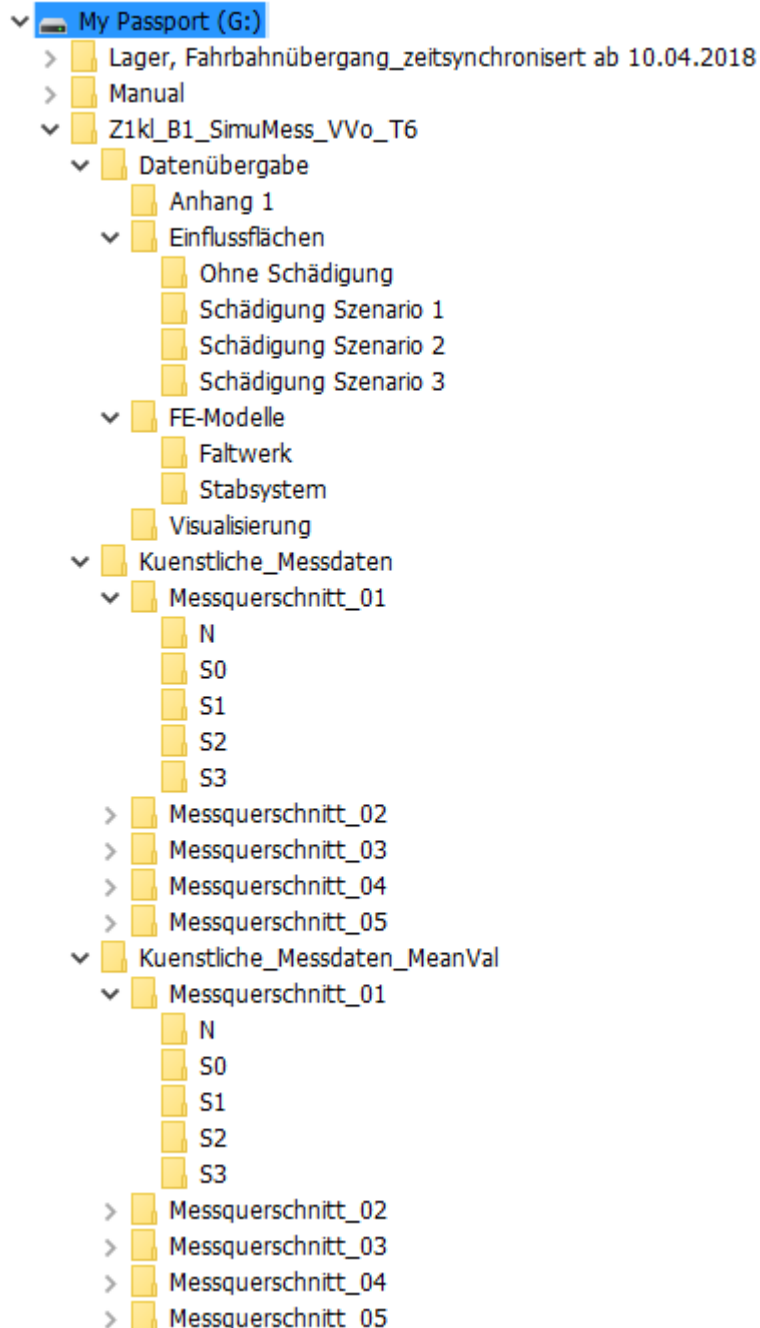


Abbildung 92: Ordnerstruktur im übergebenen Datenträger

Der Unterordner „Datenübergabe“ enthält eine Excel-Datei mit der Bezeichnung „ParameterZusammenstellung.xlsx“. Auf diese Datei wird in den nachfolgenden Absätzen weiter verwiesen.

Im Ordner „Datenübergabe“ sind die drei Unterordner „Einflussflächen“, „FE-Modelle“ und „Visualisierung“ enthalten.

Der Ordner „FE-Modelle“ beinhaltet dabei die Modell-Dateien der verwendeten Software InfoCad. Ein Export der Modelle in ein vollständig BIM-kompatible Format ist sowohl in der Software InfoCad als auch in anderen baupraktisch eingesetzten FE-Programmen nicht Stand der Technik.

Der Ordner „Einflussflächen“ beinhaltet die erzeugten und für die Generierung der künstlichen Sensordaten infolge Verkehrsbeanspruchungen verwendeten Einflussflächendateien. Diese Datensätze beinhalten in einer Auflösung von 10 cm x 10 cm die Ordinatenwerte für die Einflussflächen (bezogen auf Fahrbahnplatte). Aufgrund numerischer Erfordernisse sind die Ordinatenwerte der Einflussflächen („EFF“) in den Dateien zur Ermittlung von Dehnungen, Verschiebungen und Neigungen in messtechnisch üblichen Einheiten mit folgenden Faktoren zu multiplizieren:

- EFF von Dehnungen zum Erhalten von Dehnungen in $\mu\text{m}/\text{m}$: 0,100
- EFF von Neigungen zum Erhalten von Neigungen in mrad: 0,001
- EFF von Verschiebungen zum Erhalten von Verschiebungen in mm: 0,001

Der Unterordner „Visualisierung“ beinhaltet Excel-Dateien pro Messstelle und Messquerschnitt mit Diagrammdarstellungen der Mittel-, Maximal- und Minimalwerte der erzeugten künstliche Messdaten pro Messdatei. Hierauf wird in Absatz 6.4 näher eingegangen.

Der Ordner „Kuenstliche_Messdaten“ beinhaltet die erzeugten Dateien entsprechend dem mit dem AG abgestimmten Format. Pro Messquerschnitt existiert ein Unterordner und darin weitere Unterordner „N“, „S0“, „S1“, „S2“ und „S3“. Die darin enthaltenen Dateien haben folgenden Aufbau der Dateinamen:

MessSimu_MQ_1_N_0000000_All_V.csv

- 1) Generelle Bezeichnung der Datei
- 2) Messquerschnitt (MQ 1 bis MQ 5 in den entsprechenden Unterordnern im Ordner „Kuenstliche_Messdaten“)
- 3) Bezeichnung „N“, „S0“, „S1“, „S2“, „S3“ – vgl. auch Abbildung 91
 - a. N für die Basisdaten ohne Schädigung über 189 Tage
 - b. S0 Daten für die an „N“ anschließenden 28 Tage – ohne Schädigung
 - c. S1 Daten für die an „N“ anschließenden 28 Tage – mit Schädigung SZ 1
 - d. S2 Daten für die an „N“ anschließenden 28 Tage – mit Schädigung SZ 2
 - e. S3 Daten für die an „N“ anschließenden 28 Tage – mit Schädigung SZ 3

- 4) Fortlaufende Nummer
 - a. 0 bis 4535 für N 4536 Dateien zu je 1 h Messdaten 189 Tage
 - b. 4536 bis 5207 für Sx 672 Dateien zu je 1 h Messdaten 28 Tage
- 5) Bezeichnung „All“, „Temp“, „Traffic“
 - a. „All“ Messdaten aus Verkehr und Temperatur
 - b. „Temp“ Messdaten aus Temperatur
 - c. „Traffic“ Messdaten aus Verkehr

Bei den Messdateien selbst handelt es sich um einfache Text-Dateien. Die erste Zeile enthält die Bezeichnungen der Messkanäle, getrennt durch ein Semikolon. Der erste Messkanal ist in jeder Datei eine Zeitangabe in Unix-Zeit. Hierbei handelt es sich um die Anzahl der Millisekunden seit dem 01.01.1970 00:00:00 Uhr (UTC). Die Zeitangabe setzt sich über die gesamten Messdateien (Nummer 0 bis 5207) fort und startet in den Dateien mit der Nummer 0 beim 01. Januar 2018 um 00:00:00 Uhr (UTC). Die folgenden Messkanäle sind entsprechend den Bezeichnungen in der ersten Zeile der Datei belegt. Die Dezimaltrennung ist ein Komma. Die Messfrequenz beträgt generell 75 Hz.

Der Ordner „Kuenstliche_Messdaten_MeanVal“ beinhaltet pro Messquerschnitt jeweils in den Unterordnern „N“, „S0“, „S1“, „S2“ und „S3“ csv-Dateien mit Daten der Mittelwerte, Minimalwerte und Maximalwerte pro Messdatei. Die erste Zeile enthält dabei die beschreibenden Überschriften der durch „;“ getrennten Spalten. Zusätzlich ist in den csv-Dateien pro Messdatei und Messkanal (Messstelle) der Werte „in der Mitte“ des jeweiligen Stundenblockes an Messdaten angegeben. Diese Werte entsprechen eine theoretischen „stundenweise“ Messung.

6.2. Berücksichtigte Verkehrsparameter

Die konkret berücksichtigten Verkehrsparameter sind auf dem Datenträger in der Excel-Datei „ParameterZusammenstellung.xlsx“ zusammengestellt. Das Arbeitsblatt „DateienUndParameter“ beinhaltet darin eine Auflistung der gesamten erzeugten Messdaten. Die Tabelle beinhaltet dabei entsprechend der Spaltenüberschriften die nachfolgend zusammengefassten Informationen. Zu beachten ist dabei, dass die gesamte Parameterzusammenstellung auf Blöcken von 3 Stunden Verkehr beruht. Die Messdateien wurden jedoch „Stundenweise“ abgespeichert. Zu jeder Zeile in der Tabelle, die die Angaben zu einem 3h-Block enthält, gehören damit 3 Sätze von Messdateien.

- Schädigung
 - o ohne → Messdateien mit der Bezeichnung „N“
 - o mit → Messdateien mit den Bezeichnungen „S0“, „S1“, „S2“, „S3“
- Virtuelle Kalenderwoche
 - o Fortlaufende Aufnummerierung der Kalenderwoche, Start 01.01.2018
- Quelle Verkehrsdaten Datum/Zeit (Start 3h-Block)
 - o Angabe des Starts des 3h-Blockes aus den als Basis verwendeten realen Verkehrsdaten

- Wochentag
 - o Bezeichnung des Wochentages – zu Filter-Zwecken
- Quelle Temperaturdaten Datum/Zeit (Start 3h-Block)
 - o Angabe des Starts des 3h-Blockes der als Basis verwendeten berechneten Temperaturdaten – die angegebene Stunde sowie die beiden folgenden Stunden wurden verwendet
- Virtuelles Datum/Zeit (Start 3h-Block)
 - o Angabe des Starts des 3h-Blocks des virtuellen Datums – fortlaufendes Datum/Zeit
- Variante SV-ZuSa
 - o Angabe der verwendeten Variante der Verkehrszusammensetzung – Parameter sind im Arbeitsblatt „Verkehrszusammensetzung“ zusammengestellt
- Variante ohne/mit gen.SV
 - o Angabe ob Verkehr mit oder ohne Ansatz von genehmigungspflichtigem Schwerverkehr – Entsprechende Angaben zur Verkehrszusammensetzung im Arbeitsblatt „Verkehrszusammensetzung“
- Variante Stauverkehr
 - o Angabe Ansatz von Stauverkehr
- Stunden in Block mit Stau
 - o wenn Ansatz von Stau, dann Angabe, ob 1, 2 oder 3 h Ansatz von Stau
- Messdatei – 1 Spur 1 - SV pro 3h bis Messdatei – 3 Spur 1 - SV pro 3h
 - o Für Spur 1, Angabe der in der jeweiligen Messdatei abgebildeten mittleren Verkehrsstärke pro 3 Stunden bzw. Angabe des maximalen Abstandes der Fahrzeuge im Stau bei Ansatz von Stauverkehr
- Messdatei – 1 Spur 2 - SV pro 3h bis Messdatei – 3 Spur 2 - SV pro 3h
 - o Für Spur 2, Angabe der in der jeweiligen Messdatei abgebildeten mittleren Verkehrsstärke pro 3 Stunden bzw. Angabe des maximalen Abstandes der Fahrzeuge im Stau bei Ansatz von Stauverkehr
- Messdatei – 1 ID-Nummer bis Messdatei – 3 ID-Nummer
 - o Angabe der fortlaufenden Nummer der Messdateien
- Messdatei – 1 Startzeit (UNIX) bis Messdatei – 3 Startzeit (UNIX)
 - o Angabe der Startzeit im Zeitkanal in der Messdateien als UNIX-Zeitinformation
- Messdatei – 1 Endzeit (UNIX) bis Messdatei – 3 Endzeit (UNIX)
 - o Angabe der Endzeit im Zeitkanal in der Messdateien als UNIX-Zeitinformation

In der Excel-Datei ist des Weiteren das Arbeitsblatt „FZ-Parameter“ enthalten. Hier sind die Parameter für die durchgeführten Simulationen der Fahrzeuge hinterlegt. Es sind Angaben zu den verwendeten Gesamtgewichtsverteilung, der Achskonfiguration sowie der Verteilung des Gesamtgewichtes auf die Achsen in Abhängigkeit des Gesamtgewichtes zusammengestellt. Die Arbeitsblätter „SV_Abstand_Sp1“ und „SV_Abstand_SP2“ beinhalten die verwendeten Parameter zur Generierung der Fahrzeugabstände im fließenden Verkehr in Abhängigkeit der Fahrzeuganzahl pro 3 h.

Hinsichtlich der betrachteten Schwerverkehrsstärken für die Erzeugung der künstlichen Messdaten ist in nachfolgender Abbildung 93 der Verlauf der Grunddaten (vgl. Absatz 3.2) zusammen mit den ausgewählten Teildaten grafisch dargestellt. Abbildung 93 bezieht sich dabei auf den ersten Zeitbereich („N“) von 189 Tagen. In analoger Weise sind in Abbildung 94 die ausgewählten Daten für den 28-tägigen Zeitraum mit Umsetzung der Schädigungsszenarien dargestellt. Es wird ersichtlich, dass mit der ausgewählten Untermenge der Jahresgang des Verkehrsaufkommens abgebildet wird.

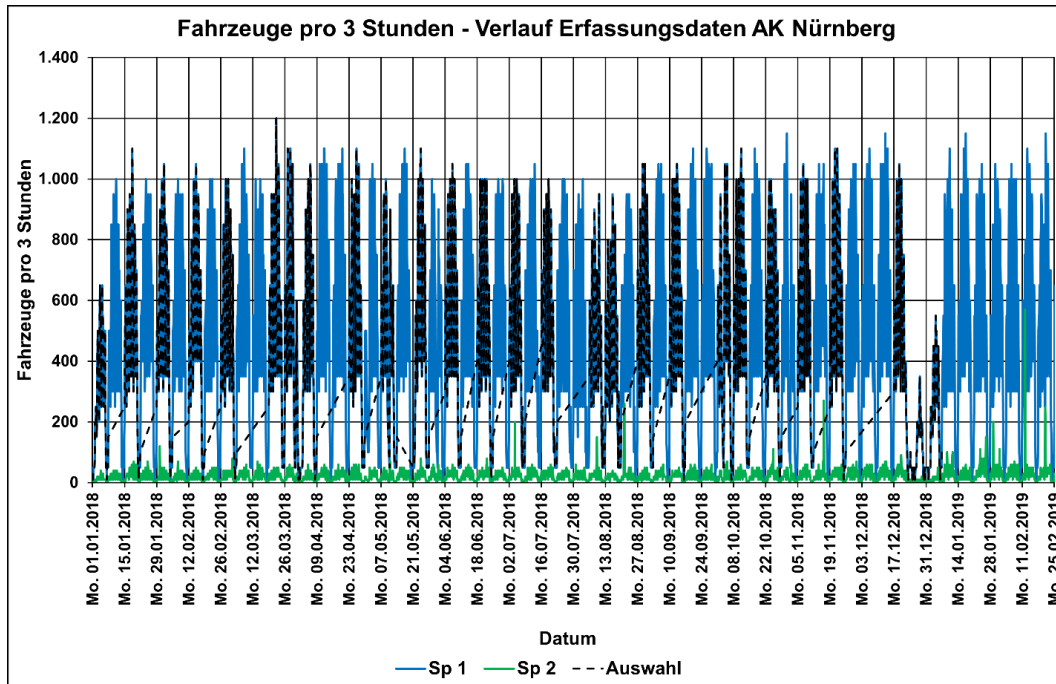


Abbildung 93: Fahrzeuganzahl pro 3 Stunden, Brücke AK Nürnberg, Januar 2018 bis Februar 2019 – Ausgewählte Zeitabschnitte – Initialzeitraum

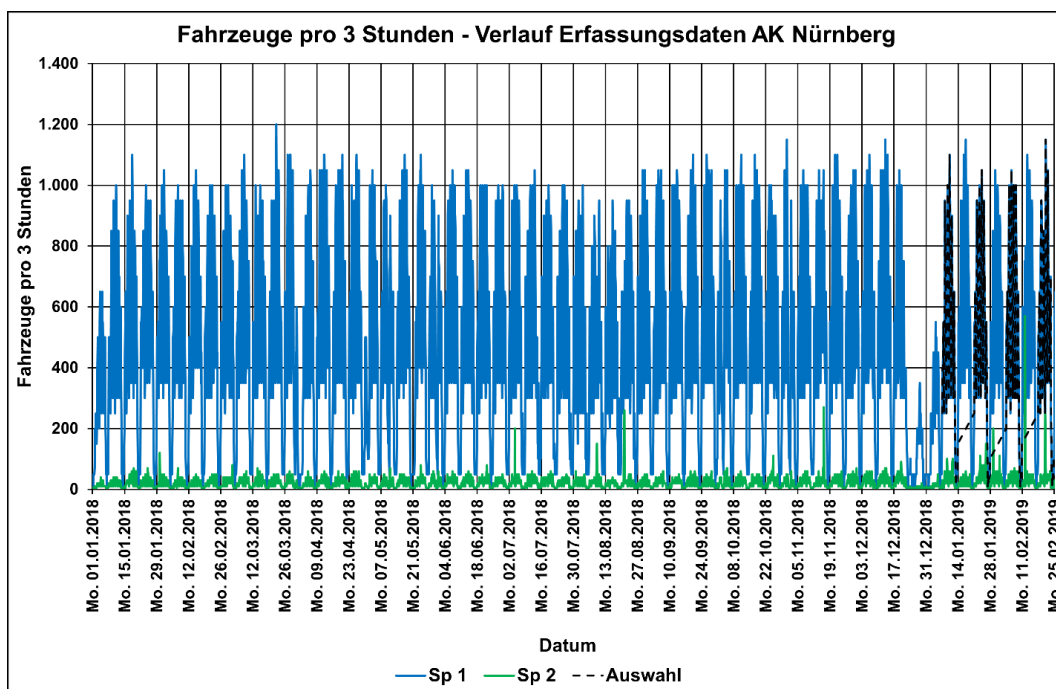


Abbildung 94: Fahrzeuganzahl pro 3 Stunden, Brücke AK Nürnberg, Januar 2018 bis Februar 2019 – Ausgewählte Zeitabschnitte - Schädigungszeitraum

6.3. Berücksichtigte Temperaturdaten

Hinsichtlich der berücksichtigten Temperaturdaten sind auf dem Datenträger in der Excel-Datei „ParameterZusammenstellung.xlsx“ die Arbeitsblätter „TemperaturBerechnung_BasisDaten“ und „TemperaturBerechnung_VerwDaten“ enthalten. Dabei handelt es sich im Arbeitsblatt „TemperaturBerechnung_BasisDaten“ um die entsprechend den Erläuterungen in Absatz 4 berechneten Werte der Temperaturkomponenten ΔT_N , ΔT_{Mz} (vertikal) und ΔT_{My} (horizontal) für das betrachtete Referenzjahr 2018. Die für den Gesamtzeitraum der erzeugten künstlichen Messdaten verwendeten Werte sind entsprechend im Arbeitsblatt „TemperaturBerechnung_VerwDaten“ abgelegt.

Nachfolgend sind in Abbildung 95 und Abbildung 97 die ermittelten Werte für ΔT_N zusammen mit den ausgewählten Abschnitten für ersten Zeitbereich („N“) von 189 Tagen und den anschließenden 28-tägigen Zeitraum mit Umsetzung der Schädigungsszenarien dargestellt. Abbildung 96 und Abbildung 98 enthalten in analoger Weise die Daten für ΔT_{Mz} (vertikal). Auf eine Darstellung der Werte für ΔT_{My} (horizontal) wird an dieser Stelle verzichtet.

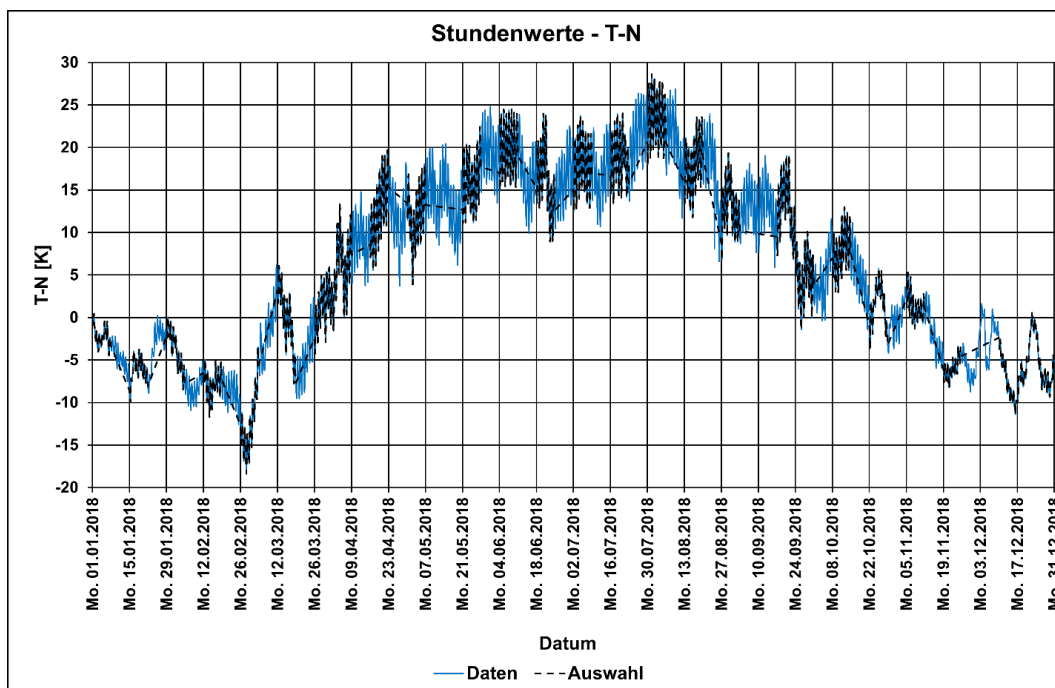


Abbildung 95: Temperaturkomponente ΔT_N – Verlauf im Referenzjahr sowie ausgewählte Abschnitte für den Initialzeitraum

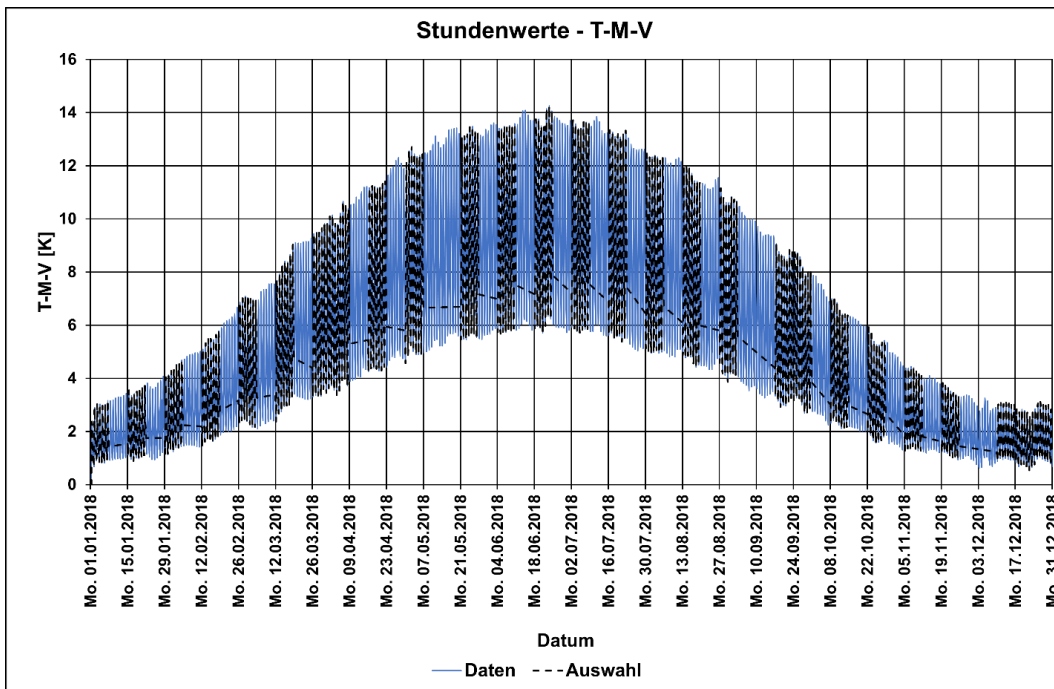


Abbildung 96: Temperaturkomponente ΔT_{Mz} – Verlauf im Referenzjahr sowie ausgewählte Abschnitte für den Initialzeitraum

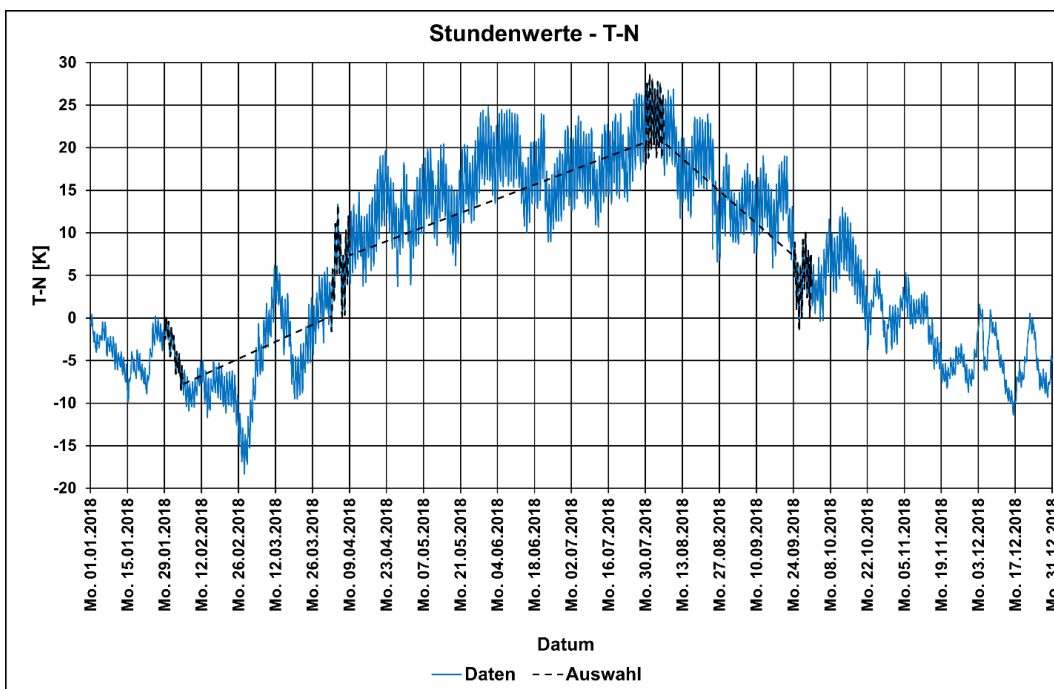


Abbildung 97: Temperaturkomponente ΔT_N – Verlauf im Referenzjahr sowie ausgewählte Abschnitte für den Schädigungszeitraum

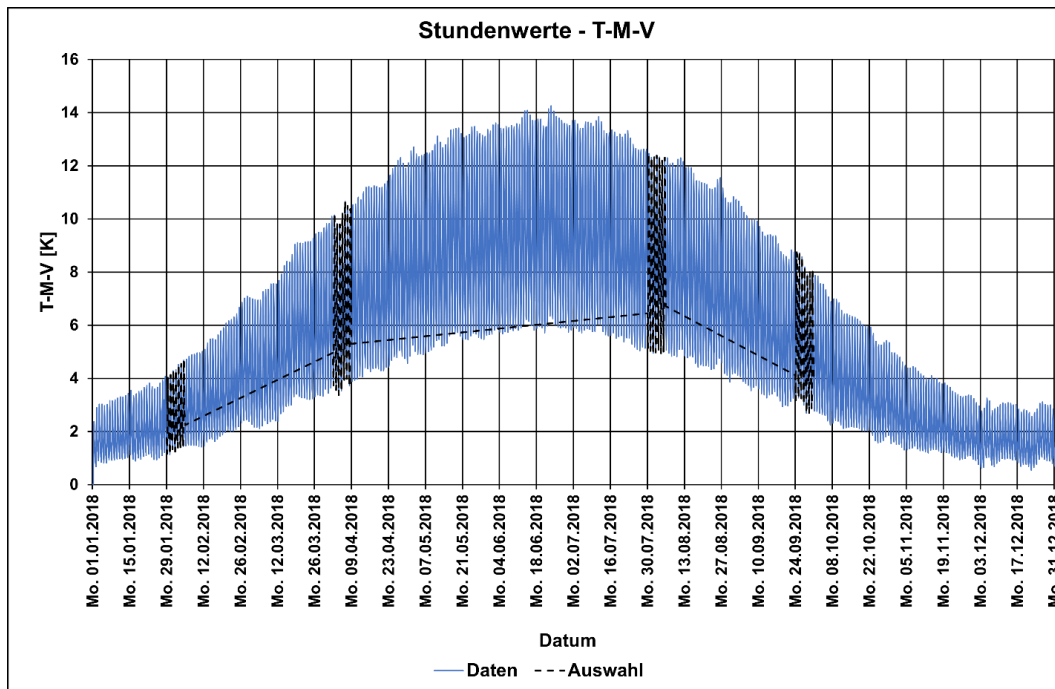


Abbildung 98: Temperatururkomponente ΔT_{Mz} – Verlauf im Referenzjahr sowie ausgewählte Abschnitte für den Schädigungszeitraum

6.4. Visualisierungen zur Dokumentation

6.4.1. Stündliche Maximal-, Minimal- und Mittelwerte

Zur Visualisierung der erzeugten künstlichen Messdaten werden nachfolgend exemplarisch Diagramme für die Messstelle „MQ_1_MS_U_Neig“ dargestellt. Die Diagramme basieren dabei auf den ermittelten Maximal-, Minimal- und Mittelwerten pro Messstelle und Messdatei. Die Rohdaten (csv-Dateien) befinden sich auf dem Datenträger im Ordner „Kuenstliche_Messdaten_MeanVal“, die aufbereiteten Diagramme sind als Excel-Dateien im Ordner „Datenübergabe/Visualisierung“ enthalten.

In nachfolgender Abbildung 99 sind die stündlichen Maximalwerte aus reiner Verkehrsbeanspruchung, also ohne Temperatureffekt, für die genannte Messstelle aufgetragen. Der schwarz dargestellte Verlauf zeigt den Zeitbereich von 189 Tagen ohne Ansatz von Schädigungsszenarien. Erkennbar ist der aus den verwendeten Parametern der Verkehrsstärke resultierende Wochengang der Werte. Der entsprechende Jahrgang ist hier, abgesehen von den letzten beiden Wochen im Zeitraum, weniger deutlich zu erkennen. Farbiger dargestellt sind im Diagramm die anschließenden Verläufe für den 28-tägigen Zeitbereich mit Schädigungsszenarien. Hier werden Unterschiede zwischen den Szenarien sichtbar, wenngleich diese in der gewählten Darstellungsform nicht deutlich erkennbar sind. In analoger Weise sind in Abbildung 100 die Minimalwerte aufgetragen.

Zur besseren Erkennbarkeit sind in Abbildung 101 und Abbildung 102 die Maximal- bzw. Minimalwerte lediglich für den 28-tägigen Zeitbereich mit Schädigungsszenarien dargestellt. Der unmittelbare Übergang vom ungeschädigten System zum geschädigten System in SZ 2 wird ersichtlich. In SZ 1 und SZ 3 ergibt sich mit Zunahme der Schädigung ein entsprechend deutlicherer Abstand der Werte zum Ausgangsverlauf (SZ 0). Aus SZ 1 und SZ 2 ergeben sich gegenüber SZ 0 betragsmäßig größere Werte. Dies folgt erwartungsgemäß aus der abgebildeten Reduzierung der Steifigkeiten und der daraus folgenden Vergrößerung der Neigungswerte. SZ 3 führt gegenüber SZ 0 zu betragsmäßig kleineren Werten. Die Einführung der Versteifung der

Lagerung in horizontaler Richtung in einer Lagerreihe an Achse 40 und 50 führt zu niedrigeren Neigungswerten. Dies entspricht ebenfalls der Erwartung und zeigt sich auch in Abbildung 60.

In Abbildung 103, Abbildung 104 und Abbildung 105 sind die Mittel-, Maximal- und Minimalwerte aus Verkehrs- und Temperaturbeanspruchung über den Gesamtzeitraum dargestellt. Für den ersten Zeitbereich von 189 Tagen ohne Ansatz von Schädigungsszenarien zeigt sich entsprechend den verwendeten Daten der Temperaturbeanspruchung ein Verlauf mit Tagescharakteristik und Jahrescharakteristik. Für den anschließenden Bereich von 28 Tagen mit Abbildung der Schädigungsszenarien zeigen sich sehr deutliche Effekte aus den Schädigungsszenarien.

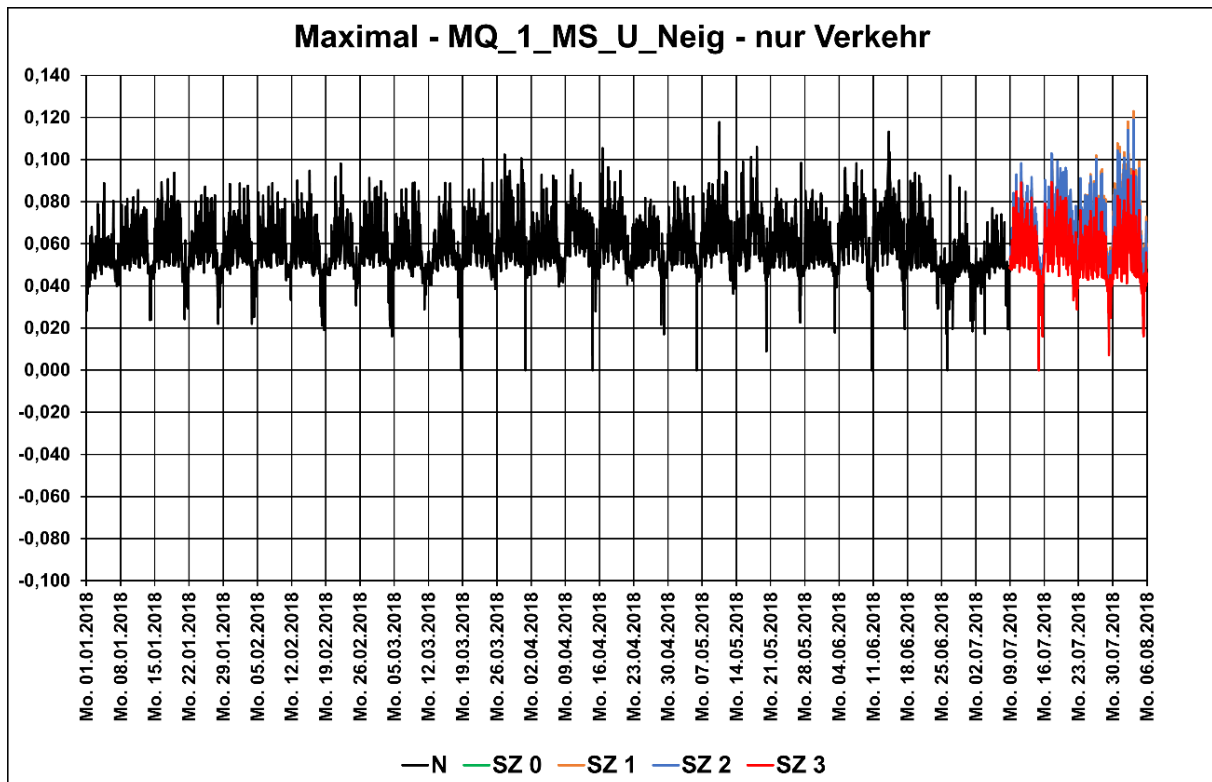


Abbildung 99: Stündliche Maximalwerte für die Messstelle „MQ_1_MS_U_Neig“ – Gesamtzeitraum – künstliche Messdaten nur aus Verkehr – Angaben in mrad

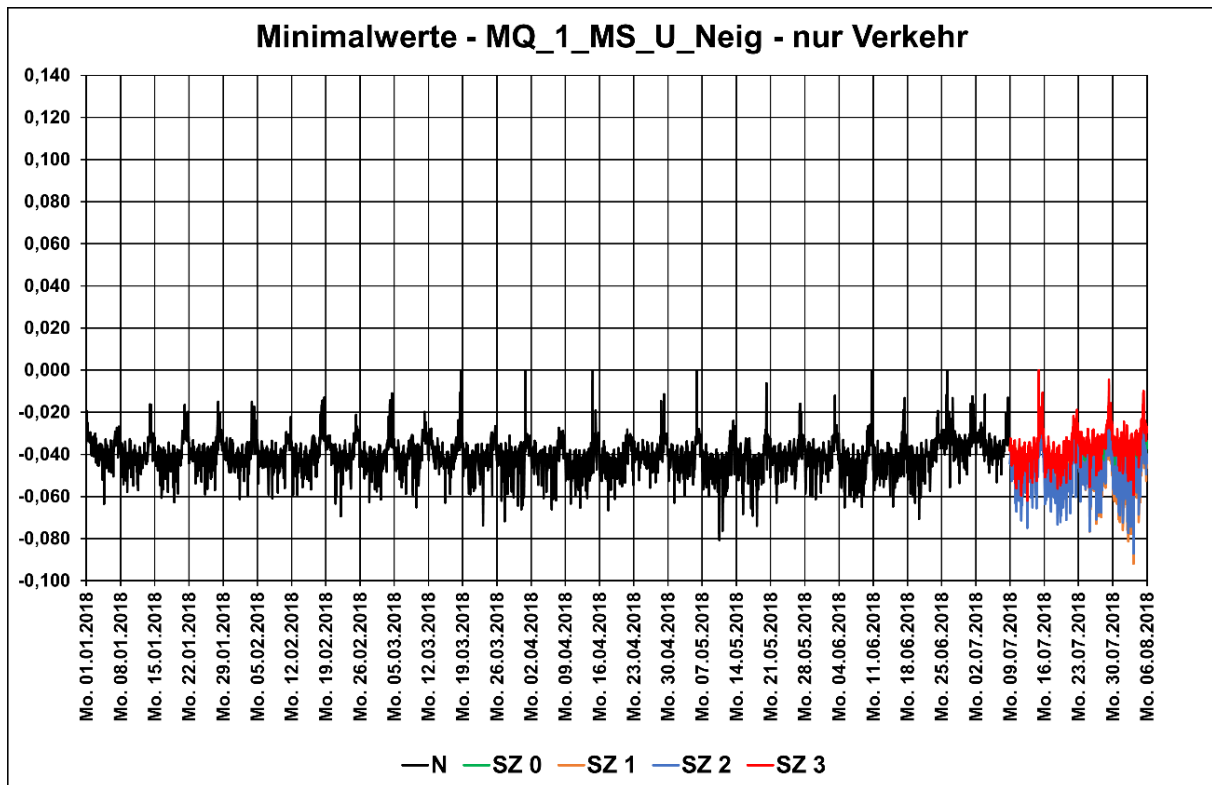


Abbildung 100: Stündliche Minimalwerte für die Messstelle „MQ_1_MS_U_Neig“ – Gesamtzeitraum – künstliche Messdaten nur aus Verkehr – Angaben in mrad

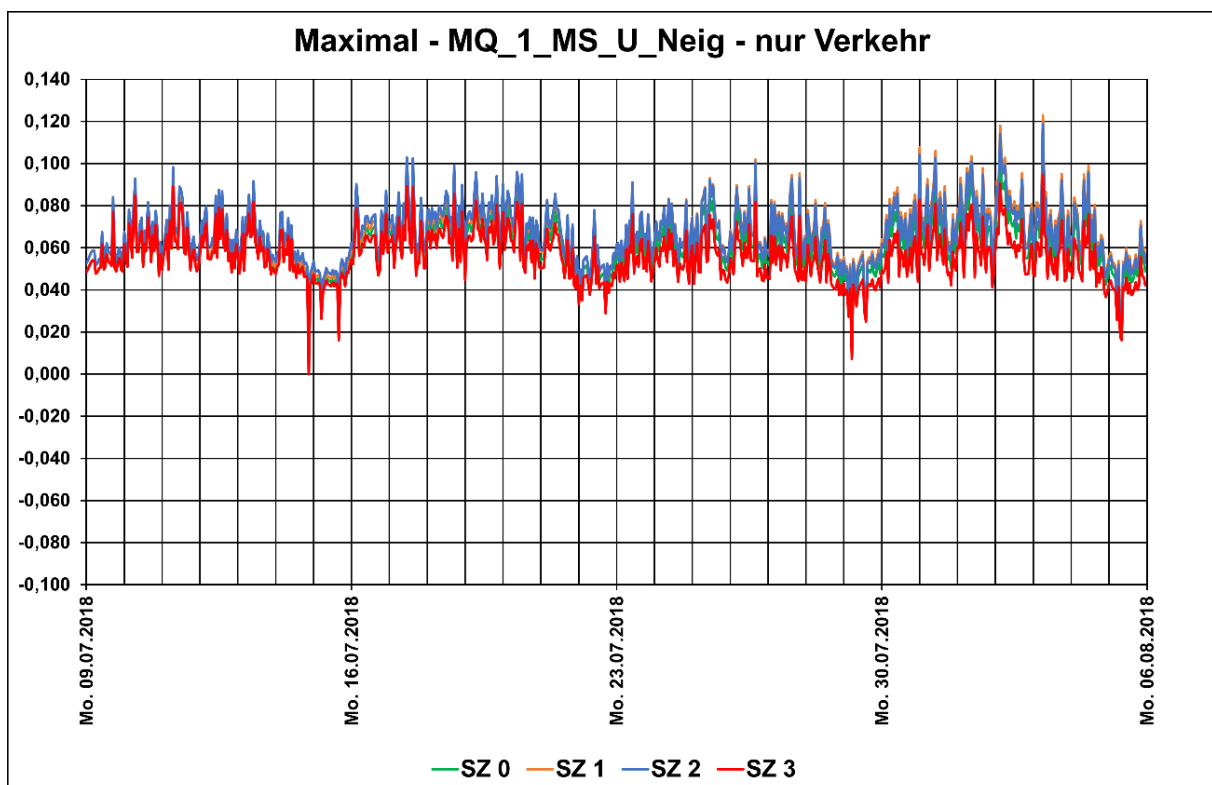


Abbildung 101: Stündliche Maximalwerte für die Messstelle „MQ_1_MS_U_Neig“ – Zeitraum Schädigungsszenarien – künstliche Messdaten nur aus Verkehr – Angaben in mrad

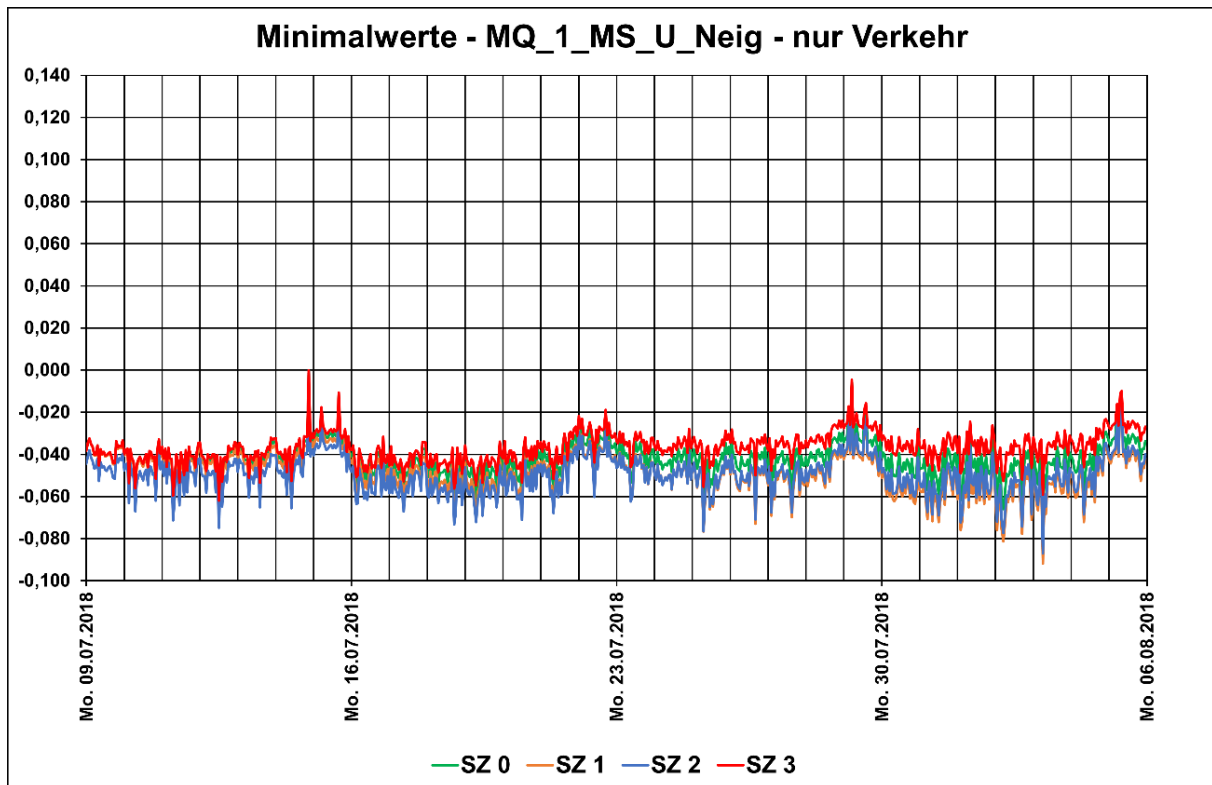


Abbildung 102: Stündliche Minimalwerte für die Messstelle „MQ_1_MS_U_Neig“ – Zeitraum Schädigungsszenarien – künstliche Messdaten nur aus Verkehr – Angaben in mrad

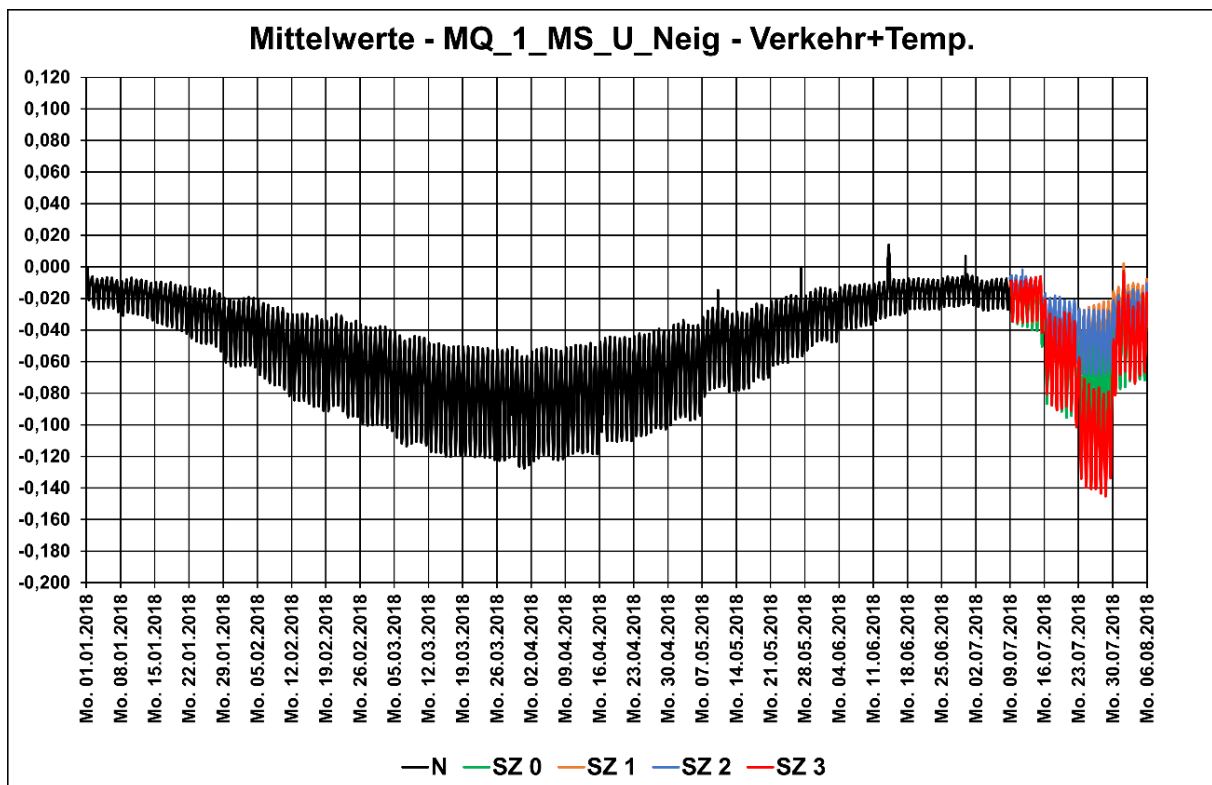


Abbildung 103: Stündliche Mittelwerte für die Messstelle „MQ_1_MS_U_Neig“ – Gesamtzeitraum – künstliche Messdaten aus Verkehr und Temperatur – Angaben in mrad

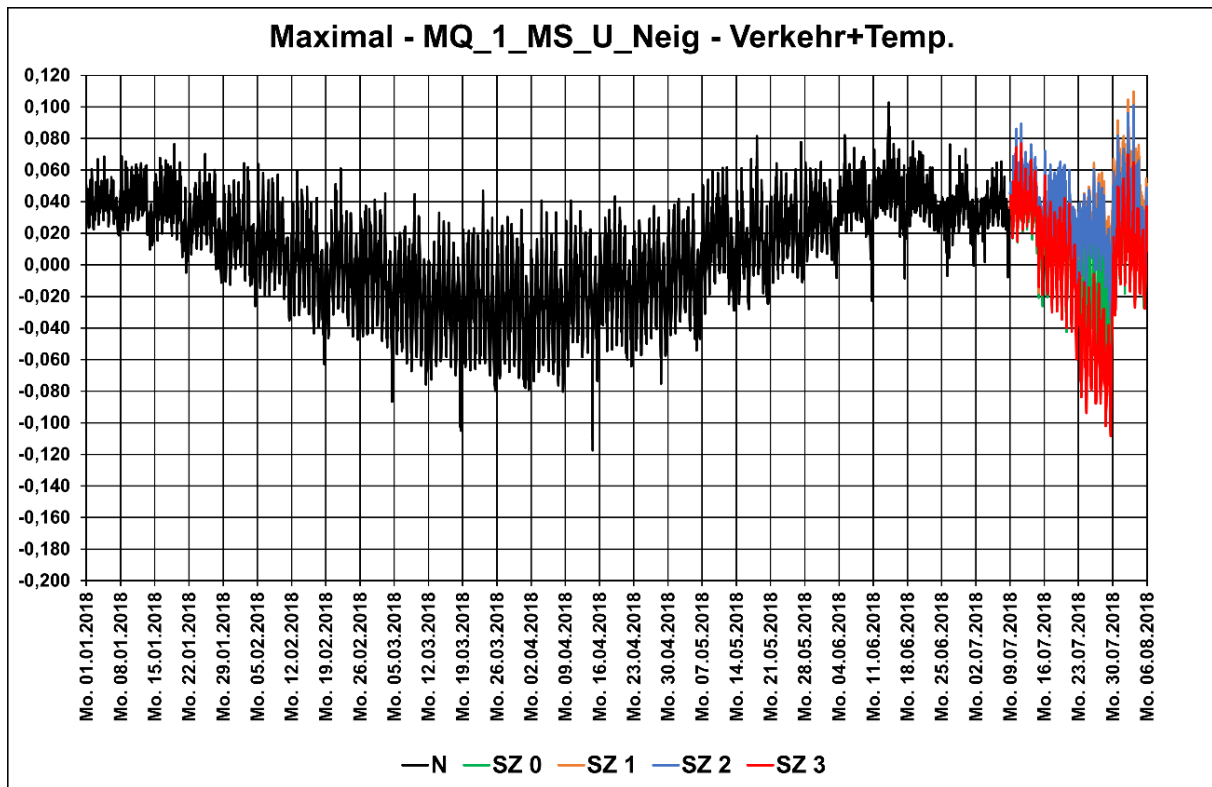


Abbildung 104: Stündliche Maximalwerte für die Messstelle „MQ_1_MS_U_Neig“ – Gesamtzeitraum – künstliche Messdaten aus Verkehr und Temperatur – Angaben in mrad

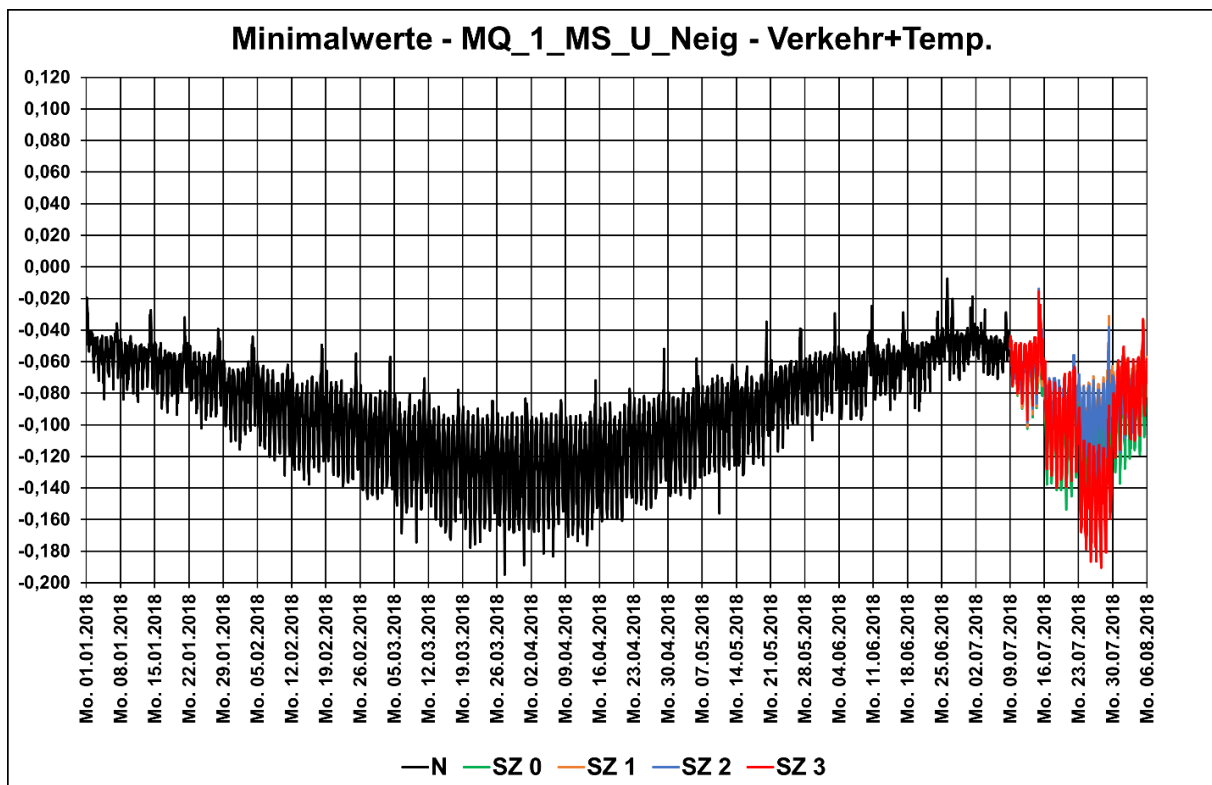


Abbildung 105: Stündliche Minimalwerte für die Messstelle „MQ_1_MS_U_Neig“ – Gesamtzeitraum – künstliche Messdaten aus Verkehr und Temperatur – Angaben in mrad

6.4.2. Beispielzeitverläufe

Zur Darstellung der erzeugten Zeitverläufe ist nachfolgend ein kurzer Ausschnitt aus dem Gesamtdatenbestand aufgeführt. Gewählt wurde dabei die Messstelle „MQ_3_Ms_U_Re_Int_u“ ab Messquerschnitt 3. Als Zeitraum wurde der 31.07.2018, 10:00:00 Uhr (UTC) gewählt. Dieser Zeitraum liegt in der letzten der 4 Wochen des betrachteten Zeitraumes mit Schädigungsszenarien. Die Szenarien SZ 1 und SZ 3, für die eine schleichende Zunahme angesetzt wurde, sind damit vollständig angesetzt (vgl. Abbildung 91 aus Seite 65).

Abbildung 106 zeigt die für die Schädigungsszenarien erzeugten Zeitverläufe für einen Zeitraum vom 3 Minuten. Zu Beginn des dargestellten Verlaufes befinden sich rechnerisch mehrere Fahrzeuge auf dem Tragwerk. Dann folgen drei Einzelüberfahrten und anschließend wieder eine Gruppe von Fahrzeugen. Abbildung 107 zeigt eine weitere Eingrenzung der Darstellung der Zeitverläufe auf die ersten 14 Sekunden der Verläufe in Abbildung 106.

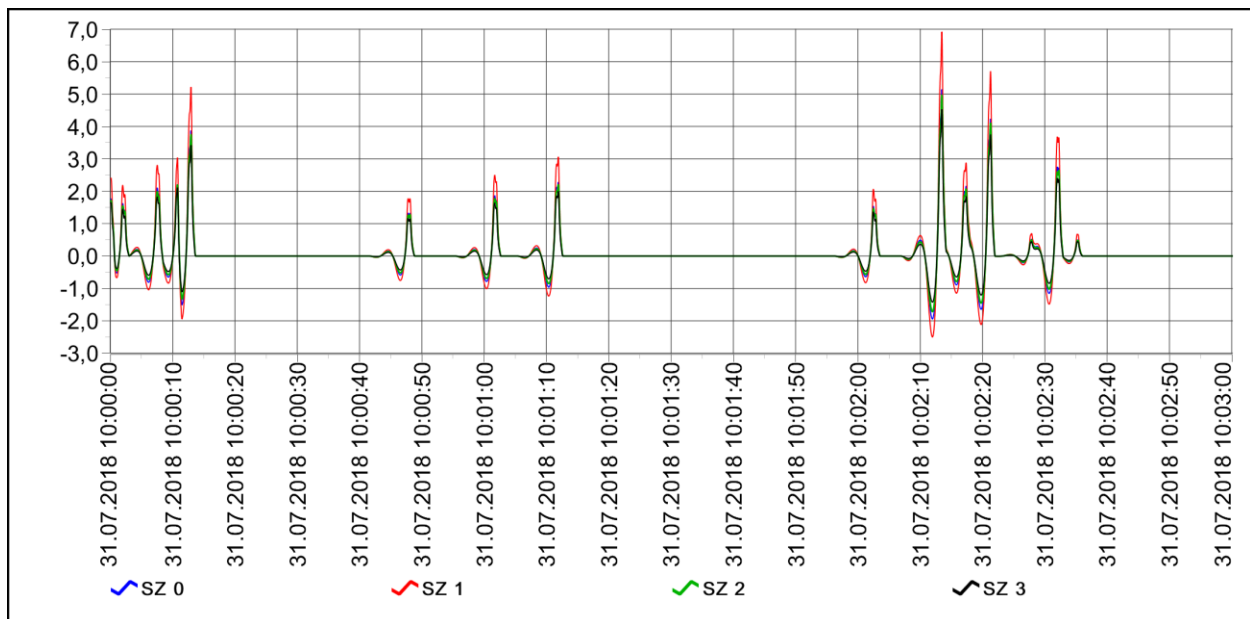


Abbildung 106: Auszug aus dem Gesamtzeitverlauf – 31.07.2018 ab 10:00:00 Uhr (UTC) – Länge 3 Minuten – Alle Schädigungsszenarien – Angaben in $\mu\text{m/m}$

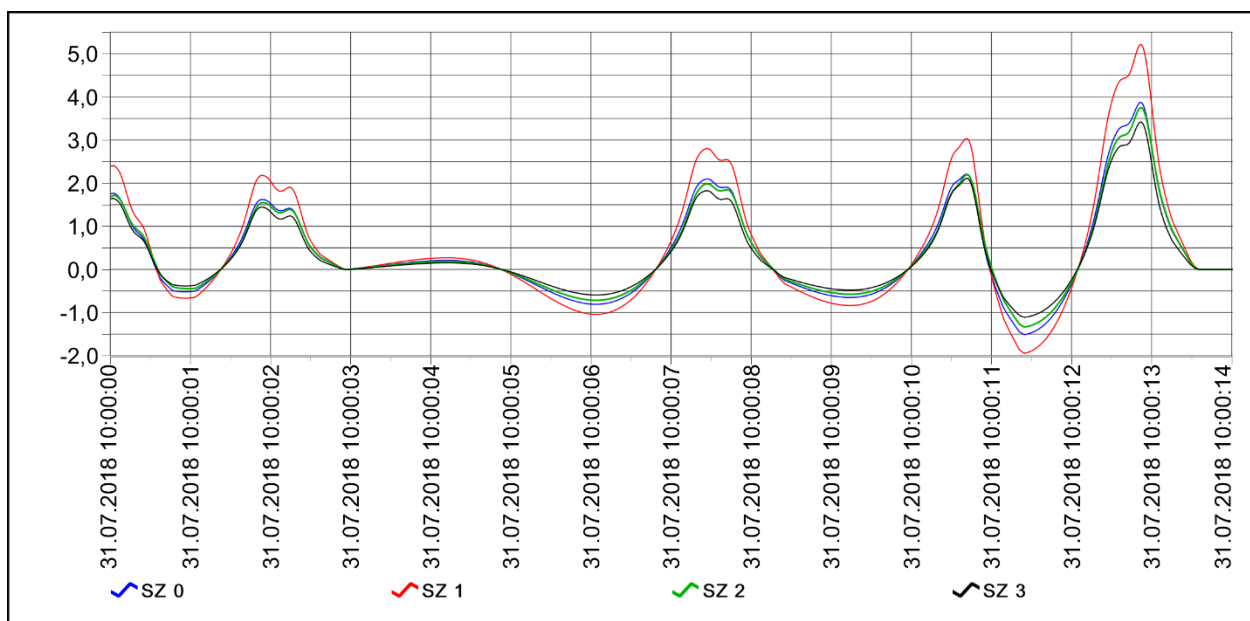


Abbildung 107: Auszug aus dem Gesamtzeitverlauf – 31.07.2018 ab 10:00:00 Uhr (UTC) – Länge 14 Sekunden – Alle Schädigungsszenarien – Angaben in $\mu\text{m/m}$

7. Zusammenfassung

In den vorliegenden Untersuchungen wurden künstliche Messdaten für ein definiertes Brückenbauwerk erzeugt. Als Referenzbauwerk wurde dabei das Bauwerk 402e im Bereich des Autobahnkreuzes Nürnberg, Richtungsfahrbahn Regensburg betrachtet. Aus anderen laufenden Forschungsprojekten liegen hierzu umfangreiche Datenbestände vor. Diese erstrecken sich von Daten zum Bauwerk selbst über Klimadaten, Daten zum überfahrenden Verkehr und Messdaten aus einem am Bauwerk installierten Monitoringsystem.

Das Bauwerk wurde in mehreren problemspezifischen FE-Modellen abgebildet und daraus sowohl Temperatureinwirkungen und daraus resultierender Tragwerksreaktionen als auch Tragwerksreaktionen infolge Verkehr ermittelt. Dies führte zu künstlichen Messdaten für das ungeschädigte Bauwerk. Die Tragwerksmodelle wurden anschließend zur Abbildung verschiedener definierter Schädigungsszenarien modifiziert und wiederum Tragwerksreaktionen aus Temperatur und Verkehr ermittelt. Dies führte zu künstlichen Messdaten für die verschiedenen betrachteten Schädigungsszenarien.

Die erzeugten Messdaten liegen auf dem beiliegenden Datenträger in definiertem Datenformat vollständig vor und können für die angezielten weiterführenden Untersuchungen verwendet werden.

8. Literaturverzeichnis

- [1] BÖNING, S.: Entwicklung einer geschlossenen Vorgehensweise zur Ermittlung von Beanspruchungen von Brückenbauwerken infolge Straßenverkehr. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, Dissertation, 2013.
- [2] BUTZ, C.; RILL, D.; FREUNDT, U.; BÖNING, S.; FRISCHER, S.; LAU, F.-L.: Digitales Testfeld Autobahn - Intelligente Brücke - Untersuchungsprogramm (3. Zwischenbericht FE 15.0615/2015/ARB) (Forschungsbericht). Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen, 2020.
- [3] FOUAD, N. A.: Rechnerische Simulation der klimatisch bedingten Temperaturbeanspruchungen von Bauwerken : Anwendung auf Beton-Kastenträgerbrücken und -Sandwichwände. Berlin: Technische Universität Berlin, Dissertation, 1997.
- [4] FREUNDT, U.; BÖNING, S.: Anpassung des DIN-Fachberichts 101 „Einwirkungen auf Brücken“ an Eurocodes - Zukunftsfähiges Lastmodell für Straßenverkehrslasten. In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Brücken- und Ingenieurbau - Heft B 77. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 2011.
- [5] FREUNDT, U.; BÖNING, S.: Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand - Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Brücken- und Ingenieurbau - Heft B 82. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 2011.
- [6] FREUNDT, U.; BÖNING, S.: Einfluss der veränderten Verkehrsführung bei Ertüchtigungsmaßnahmen auf die Bauwerksbeanspruchung - Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Brücken- und Ingenieurbau - Heft B 97. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 2014.
- [7] FREUNDT, U.; BÖNING, S.; FRISCHER, S.; LAU, F.-L.: Digitales Testfeld Autobahn - Intelligente Brücke - Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten (Entwurf Schlussbericht FE 15.0631/2016/LRB) (Forschungsbericht (noch nicht veröffentlicht)). Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen, 2020.
- [8] HASAN, H.: Klimatische Temperatureinwirkungen auf Brückenbauwerke. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, Dissertation, 2014.
- [9] LICHTER, U.: Klimatische Temperatureinwirkungen und Kombinationsregeln bei Brückenbauwerken. München: Universität der Bundeswehr, Dissertation, 2004.
- [10] MADALENO, A. C. L.: Erfassung von Verformungs- und Spannungszuständen im jungen Beton infolge Temperatur. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, Dissertation, 2002.
- [11] Deutscher Wetterdienst: Wetterdaten Messstation Nürnberg Flughafen (Daten 2018), Online im Internet: <https://cdc.dwd.de/portal/201912031600/mapview>. (aufgerufen am 01.10.2020)