



Verbesserung beim Nachweis der Restlebensdauer von Eisenbahnbrücken

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau
an der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften der Technischen Universität Graz

vorgelegt von

MICHAEL OLSCHNEGGER

Betreuung:

Univ. Prof. DI Dr. Harald Unterweger

Institut für Stahlbau der technischen Universität Graz

Mitbetreuung:

Dipl.-Ing. Andreas Kamplleitner, Institut für Stahlbau, TU Graz

Graz, September 2015

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

AFFIDAVIT

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....
date

.....
(signature)

DANKSAGUNG

Ich bedanke mich bei Herrn **Univ. Prof. DI Dr. Harald Unterweger**, der mir die Chance gab im Rahmen dieser Masterarbeit, mein Wissen zu erweitern und um viele wertvolle Erfahrungen reicher zu werden.

Außerdem danke ich **Dipl.-Ing. Andreas Kamleitner** für seine Unterstützung und die wertvollen Gespräche, mit denen er mir sehr oft weitergeholfen hat.

Weiters danke ich **Dipl.-Ing. Paul Kugler BSc** für seine Hilfe bei der Auswertung der Ergebnisse.

Ich danke **meiner Familie**, vor allem aber **meinen Eltern Hannes und Eva Olschnegger**, die mir diese Ausbildung ermöglicht haben und immer dafür gesorgt haben, mich um nichts anderes kümmern zu müssen. Danke dass ihr mir immer eine große Unterstützung seid und immer an mich glaubt.

Besonders danken möchte ich auch meiner Freundin **Sonja Sabine Safran**, die mir immer zur Seite steht und mich auch in schwierigen Zeiten versucht zu motivieren - ohne dich wäre vieles nicht so einfach gewesen.

Schließlich danke ich auch **meinen Studienkollegen und Studienkolleginnen Angelika, Jakob, Janina und Martin**, die mir geholfen haben meine Studienzeit zu einem wundervollen und lustigen Abschnitt in meinem Leben zu machen.

Zusammenfassung

Ziel dieser Masterarbeit ist eine Verbesserung der Nachweisführung der Restlebensdauer von Eisenbahnbrücken. Anstoß zur Beschäftigung mit dieser Thematik ist der Umstand, dass die Nachrechnung von Bestandsbrücken laut aktueller Normung des Öfteren keine Ausreichende Restlebensdauer mehr ergibt, obwohl diese Tragwerke keinerlei beunruhigende Schäden aufweisen.

Zur Modifizierung der Nachweisführung erfolgte ein Vergleich der Eurocodekollektivbeiwerte λ_1 mit jenem eines alternativen Lastmodells der Betriebszüge. Hierfür wurde die Überfahrt der EC-Betriebszüge simuliert und daraus der Kollektivbeiwert λ_1 ermittelt. Diese Analyse erfolgte anhand einer Bestandsbrücke in Fachwerkbauweise mit offener Fahrbahn (Kugelsteinbrücke) in der Steiermark.

Sind die Faktoren λ_1 günstiger als jene des Eurocodes, kann sich durch die Änderung des schadensäquivalenten Einstufenkollektives die rechnerische Restlebensdauer der Brücke dramatisch zum positiven verschieben. Dadurch können alte Bestandsbrücken länger in Betrieb bleiben und müssen nicht - ohne Schäden aufzuweisen - vorzeitig saniert oder durch Neubauten ersetzt werden.

Da die untersuchte Brücke zusätzlich eine Gleislage im Bogen aufweist, wurde auch die Mitwirkung der Horizontalkraft bei der Überfahrt miterfasst und deren negativer bzw. positiver Einfluss auf die Höhe des schadensäquivalenten Einstufenkollektives untersucht.

Gleichzeitig können alle Ergebnisse auch auf gerade Brücken umgelegt werden, da jede Überfahrtssimulation auch mit ausschließlich vertikalen Achslasten durchgeführt wurde.

ABSTRACT

The intention of this thesis is an improvement of the verification of the remaining lifetime of a railway bridge. The reason to focus on this topic is because many existing bridges need to be renewed or reconstructed since the actual Eurocode doesn't grant any lifetime remaining, though there are no worrying damages located.

To modify these verifications the Eurocode-collective-factor λ_1 and an alternative load model of service trains were compared. For this comparison a passage of these Eurocode-trains was simulated and resultant the collective-factor λ_1 was build. For the analyses an existing bridge in carcass design with an open rail track (Kugelsteinbrücke) in Styria was reviewed.

If at least one of this analyzed factors λ_1 is more favorable than the factor of the Eurocode, the changes of the calculated lifetime can be dramatically positive. In this case existing bridges can take their business for longer time and don't need to be - without possessing damages - renewed or reconstructed.

Hence the analyzed bridge (Kugelsteinbrücke) has its track set in a curve, the horizontal forces due to the passage were included and its negative or positive effects to the harm-equivalent one-level-collective reviewed.

The results can be used to calculate even straight bridges because all calculation and simulations were additionally made with only vertical axis loads.

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	5
1 EINLEITUNG	7
2 DIE KUGELSTEINBRÜCKE.....	8
2.1. ALLGEMEINE ANMERKUNGEN	8
2.2. AKTUELL EINGESCHRÄNKTE BETRIEBSWEISE	9
2.3. BAUSTATISCHE MODELLIERUNG DES TRAGWERKS	10
2.4. UNTERSUCHTE PUNKTE	12
3 LASTMODELLE	14
3.1. ALLGEMEINES	14
3.2. „NORMENLASTENZUG UIC“ LASTMODELL 71	14
3.2.1 <i>Nachweisformat Lastmodell 71</i>	15
3.3. LASTMODELL BETRIEBSZÜGE	15
3.3.1 <i>Nachweisformat Lastmodell Betriebszüge</i>	19
3.4. DYNAMISCHE BETRIEBSFAKTOREN Φ_2 UND Φ_{BZ}	19
4 BERECHNUNG	21
4.1. BERECHNUNG LASTMODELL 71	21
4.1.1 <i>Lastaufstellung für Untergurt U1/U2</i>	22
4.1.2 <i>Lastaufstellung für Untergurt U6</i>	23
4.1.3 <i>Lastaufstellung für Pfosten H4</i>	24
4.1.4 <i>Lastaufstellung für Längsträger L_{ges}</i>	26
4.1.5 <i>Lastaufstellung für Querträger Q_{ges}</i>	28
4.1.6 <i>Lastaufstellung für Diagonalstab D1</i>	30
4.1.7 <i>Lastaufstellung für Diagonalstab D3</i>	32
4.2. BERECHNUNG LASTMODELL BETRIEBSZÜGE	34
4.2.1 <i>Lastenzug Typ 2</i>	36
4.2.2 <i>Lastenzug Typ 3</i>	44
4.2.3 <i>Lastenzug Typ 5</i>	52
4.3. AUSWERTUNG	59
4.3.1 <i>Auswertung Lastmodell 71</i>	59
4.3.2 <i>Auswertung Lastmodell Betriebszüge</i>	63
5 ERGEBNISSE	71
5.1. ERGEBNISDISKUSSION	76
5.1.1 <i>Untergurt U1/U2</i>	76

5.1.2	<i>Untergurt U3</i>	76
5.1.3	<i>Untergurt U6</i>	77
5.1.4	<i>Untergurt U7</i>	77
5.1.5	<i>Pfosten H4</i>	78
5.1.6	<i>Pfosten H5</i>	78
5.1.7	<i>Querträger Q_{ges}</i>	79
5.1.8	<i>Längsträger L_{ges}</i>	79
5.1.9	<i>Diagonalstab D1</i>	80
5.1.10	<i>Diagonalstab D2</i>	80
5.1.11	<i>Diagonalstab D3</i>	80
5.1.12	<i>Diagonalstab D4</i>	81
5.2.	FAZIT	82
LITERATURVERZEICHNIS		83
ABBILDUNGSVERZEICHNIS		84
TABELLENVERZEICHNIS		86
ANHANG A. AUTOMATISIERTE LASTAUFSTELLUNG FÜR LASTMODELL 71		87
ANHANG B. EINFLUSSLINIENBERECHNUNG		89
ANHANG C. DARSTELLUNG LASTENZÜGE		90
ANHANG D. SPANNUNGSVERLÄUFE DER RESTLICHEN LASTENZÜGE		93
D.1.	SPANNUNGSVERLÄUFE LASTENZUG TYP 1	93
D.2.	SPANNUNGSVERLÄUFE LASTENZUG TYP 4	97
D.3.	SPANNUNGSVERLÄUFE LASTENZUG TYP 6	101
D.4.	SPANNUNGSVERLÄUFE LASTENZUG TYP 7	105
D.5.	SPANNUNGSVERLÄUFE LASTENZUG TYP 8	109
ANHANG E. SPANNUNGSKOLLEKTIVE GLEIS 1 UND GLEIS 2		113

1 EINLEITUNG

Die Eisenbahn wurde im letzten Jahrhundert zu einem unverzichtbaren Verkehrsmittel und wird es auch in Zukunft sein. Deshalb ist es wichtig, die Infrastruktur immer auf dem neusten Stand zu halten und so einen ungehinderten Eisenbahnverkehr zu ermöglichen. Zu dieser Infrastruktur gehören auch die Eisenbahnbrücken. Diese wurden jedoch überwiegend vor langer Zeit erbaut, was heute großen Aufwand an Sanierungen und Neubauten erfordert.

Bei diesen alten Bauten kann, aufgrund der neuen Nachweisformate, häufig keine Restlebensdauer mehr nachgewiesen werden, auch wenn bisher keine oder nur geringe Schädigungen aufgetreten sind. Die Sanierung oder der Neubau dieser Brücken erfordern aufgrund des durchgehenden Betriebs umfangreiche logistische Überlegungen und sind außerdem auch mit sehr hohen Kosten verbunden, obwohl diese nicht immer nötig wären. Deshalb ist es notwendig, die vereinfachten Lastmodelle des Eurocodes kritisch zu hinterfragen und zu überprüfen, ob mit einer genaueren Berechnungsmethode und dem damit verbundenen Mehraufwand bessere Ergebnisse erzielt werden können.

Der erhöhte Berechnungsaufwand ist auch der Grund dafür, dass diese alternativen und auch genaueren Berechnungen in der Praxis keine Anwendung finden und für einen Neubau aufgrund des erhöhten Aufwands und der zusätzlichen Kosten nur bedingt sinnvoll sind. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Vergleich des Lastmodells 71 und des Lastmodells „Betriebszüge“, welches eine 3D-Modellierung und die Simulation der Überfahrten dieser Züge erfordert, des Eurocodes an der Kugelsteinbrücke in Frohnleiten (Steiermark) untersucht.

Diese Arbeit soll zeigen, dass die Berechnungen mittels Lastmodell 71 zwar einfacher, jedoch auch konservativer sind und dass alte Brücken oft länger genutzt werden könnten als durch diese Berechnungen nachgewiesen.

2 Die Kugelsteinbrücke

2.1. *Allgemeine Anmerkungen*

Beim betrachteten Bauwerk, deren Auf- und Grundriss in Abb. 2.1 zu sehen ist, handelt es sich um eine zweigleisige Eisenbahnbrücke mit einem reinen Stahltragwerk und offener Fahrbahn. Die beiden Hauptträger der einfeldrigen Trogbrücke bilden die zwei außenliegenden geraden Fachwerkträger deren Bauhöhe gegen Feldmitte leicht zunimmt. Das 1965 errichtete Tragwerk hat eine Stützweite von $L=60\text{m}$. Die Brücke liegt in einem Bogen der Strecke, weshalb die beiden Gleise im Brückenbereich einen Krümmungsradius von $R=750\text{m}$ aufweisen. Die Bauteile selbst sind geschweißt und die Baustellenstöße sind überwiegend genietet.

Die offene Fahrbahn besteht aus Querträgern aus I-Querschnitten, welche im Abstand von $e_{QT}=6,0\text{m}$, biegesteif an die Hauptträger genietet sind. Die insgesamt 4 Längsträger (Schwellenträger), ebenfalls als geschweißte I-Profile ausgeführt, sind polygonal zwischen den Querträgern, der Gleiskrümmung folgend, biegesteif durchgebunden und wirken als Durchlaufträger. Die Längsträgerobergurte sind an die ausgeführte Gleisüberhöhung angepasst, wodurch sich deren Höhenlage über die Länge der Brücke ändert. Direkt auf den Längsträgerobergurten sind die Holzschwellen der Gleise gelagert und verankert.

Die stählernen Brückenlager sind in Achse 0 als allseitig feste Lager und in Achse 0' als längsbewegliche Stelzenlager ausgeführt.

Für die Tragwerksaussteifung sind zwischen den beiden Längsträgerpaaren je Gleis durchgehend horizontale Schlingerverbände, in Form eines Pfostenfachwerks angeordnet. Des Weiteren ist jeweils ein K-Verband an der Unterseite der HT-Untergurte und in der Ebene der HT-Obergurte ausgeführt. Zwei Endportale sind an den Enden des oberen Verbandes ausgebildet, die in der Ebene der Enddiagonalen der beiden Hauptträger verlaufen und an den Endquerträger anschließen. Ein zusätzlicher Bremsverband ist in Tragwerksmitte angeordnet

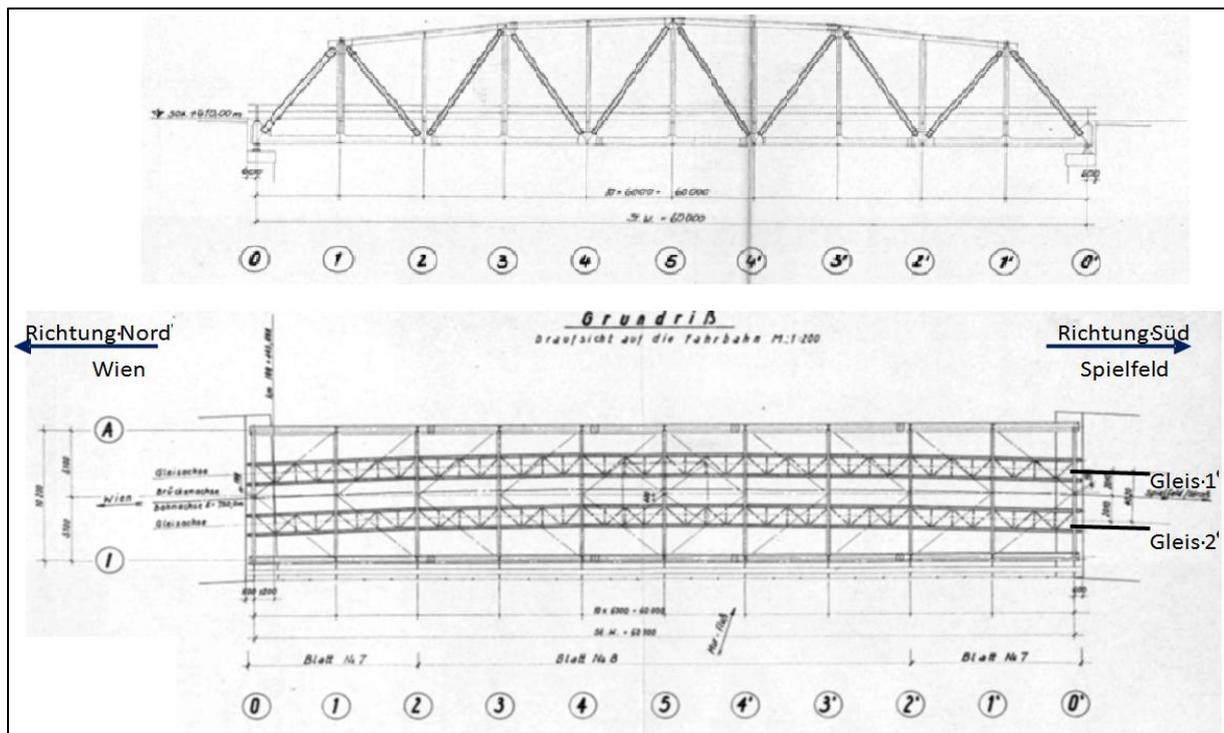


Abb. 2.1: Auf- und Grundriss der Kugelsteinbrücke

2.2. Aktuell eingeschränkte Betriebsweise

Da nach EC-Ermüdungsnachweis und aktuell gültigen Lastmodellen die Restlebensdauer des Tragwerks der Kugelsteinbrücke erschöpft ist, obwohl sich das Haupttragwerk noch in einem sehr guten Zustand befindet, wurde auf Basis der ONR 2002 ein Tragsicherheitsnachweis geführt, aus dem Verstärkungsmaßnahmen an einigen Bauteilen hervorgingen und die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf der Brücke reduziert wurde.

Das eigentliche Problem bei Eisenbahnbrücken ist aber die Ermüdungsfestigkeit. Vor der Errichtung der Brücke wurden zwar Ermüdungsnachweise (damals als „Dauerfestigkeitsnachweis“) durchgeführt, jedoch nicht für alle Bauteile, sondern nur für jene an denen dies bemessungsbestimmend wurde. Nach heutigem Wissensstand weiß man allerdings, dass die damals angenommenen Dauerfestigkeiten - bestimmt an Kleinproben - deutlich überschätzt wurden.

Des Weiteren müssen bei dieser Brücke auch dynamische Lasten mitberücksichtigt werden, da die Brücke im Gleisbogen liegt und deshalb starke Horizontalbelastungen aufgrund der Fliehkräfte entstehen. Auch haben Augenzeugen berichtet, dass es bei Zugsüberfahrten mit höheren Fahrgeschwindigkeiten ($v \geq 100$ km/h) insbesondere bei den Portalen zu nennenswerten Horizontalverschiebungen des Querriegels in Brückenquerrichtung kommt.

2.3. *Baustatische Modellierung des Tragwerks*

Das 3D-Modell der Kugelsteinbrücke wurde bereits für andere Forschungsprojekte des betreuenden Instituts verwendet und konnte deshalb für diese Arbeit zur Verfügung gestellt werden. Die Modellierung erfolgte mit dem Stabwerksprogramm RSTAB (Fa. Dlubal) als räumliches Stabtragwerk mit allen Bauteilen und Verbandstäben, bei dem sämtliche Exzentrizitäten berücksichtigt wurden. (Abb. 2.2 und Abb. 2.3)

Die Querschnitte der Brücke wurden mit dem Programm DUENQ (Fa. Dlubal) modelliert und in das Baustatik-Programm eingefügt. Für die Ermittlung der Stabsteifigkeiten wurden die Brutto-Querschnitte verwendet.

Aufgrund der Anzahl und Anordnung der Nieten in den Verbindungen der einzelnen Elemente wurden sämtliche Knoten (mit Ausnahme der Fachwerkstäbe des Schlingerverbands zwischen den Längsträgern und des unteren Verbands) als biegesteife Knoten modelliert. Die vertikale Lagerung des Tragwerks erfolgte an den vier Lagerpunkten im Bereich der Endquerträger. Die horizontale Lagerung wurde zwängungsfrei eingegeben.

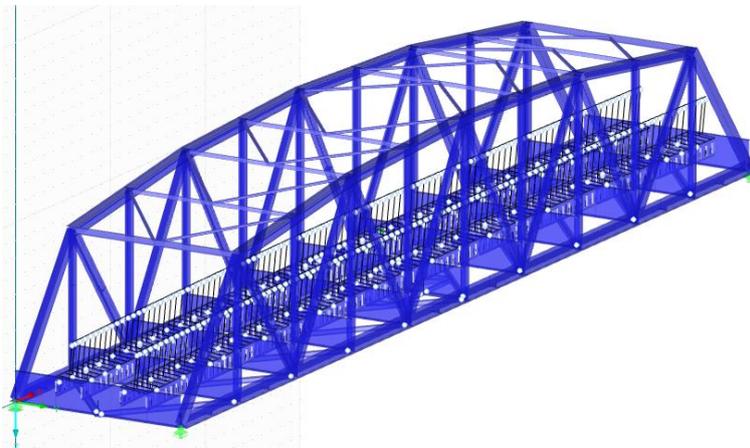


Abb. 2.2: 3D-Vollmodell der Kugelsteinbrücke

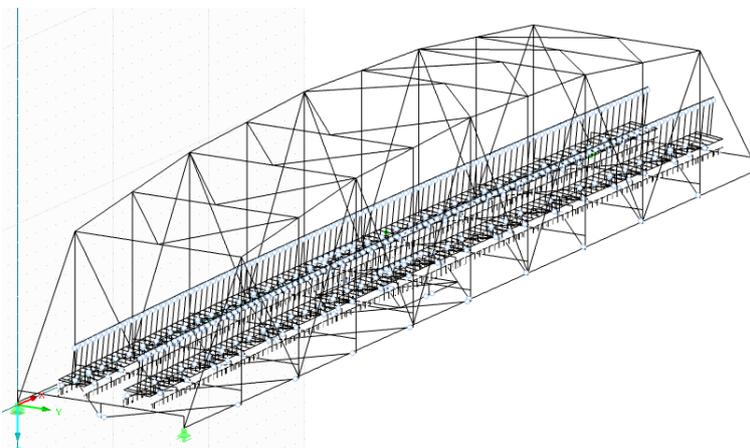


Abb. 2.3: 3D-Stabmodell der Kugelsteinbrücke

Die Lasteinleitung erfolgte über eine geeignete „Hilfskonstruktion“ aus gewichtslosen Stäben, welche sowohl die vorhandene Überhöhung als auch den normenmäßig definierten Lasteinleitungspunkt 1,80 m über Schienenoberkante korrekt abbildet. Die in Abb. 2.4 dargestellten Lasteinleitungsträger zur Aufbringung der Gleislast wurden über starre „T-Böcke“ alle 60cm mit den Schwellenträgern gekoppelt. Dabei wurde besonders darauf geachtet, dass keine ungewollten zusätzlichen Steifigkeiten in das Tragwerk eingebaut wurden.

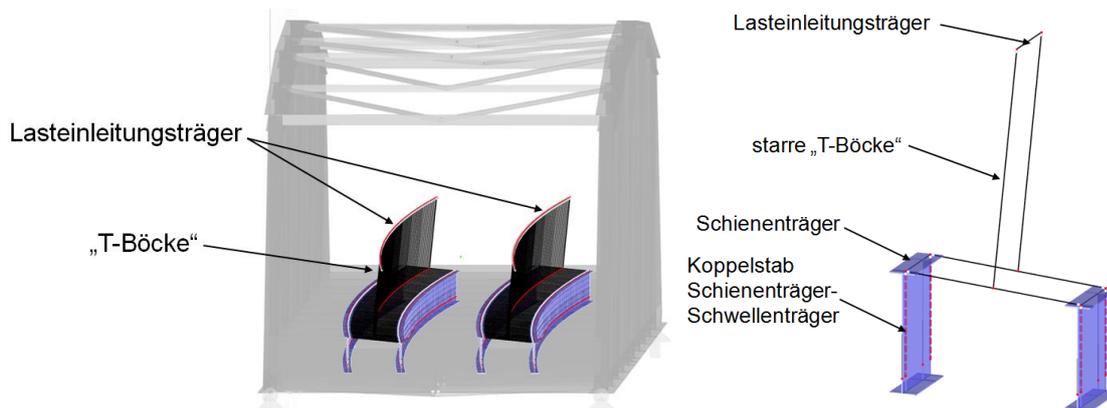


Abb. 2.4: Lasteinleitung in die Schwellenträger unter Berücksichtigung des Lastangriffspunktes und Überhöhung

Einige Untersuchungspunkte waren bereits als solche vorhanden und es wurde nur deren Position überprüft. Für jeden zusätzlichen Bauteil, der untersucht werden sollte, wurde ein Punkt in dessen Mitte eingefügt. Die Punkte waren deshalb von großem Nutzen, da sie das Exportieren und Filtern der Ergebnisse sehr vereinfachten.

2.4. Untersuchte Punkte

Zu Beginn der Arbeit wurden insgesamt 26 Punkte an den beiden Hauptfachwerkträgern untersucht, wobei es sich bei zwölf Punkten um Spiegelungen anderer Punkte um die Symmetrieachse handelt. Weiters wurden acht Stellen an den Längsträgern, sowie fünf an den Querträgern untersucht. Die Obergurte der Fachwerkträger wurden nicht extra untersucht, da sich diese gleich wie die Untergurte verhalten, mit dem einzigen Unterschied, dass die anstatt der Zug- eine Druckbeanspruchung erfahren.

Die Bezeichnungen der einzelnen Punkte wurden Großteils von einem vorhergegangenen Projekt übernommen, bei dem Dehnmessstreifen an die Träger angebracht wurden. Daher sind manche Punkte mit mehreren Ziffern bezeichnet. In [1] bedeutete Q_{ges} , dass hier am Querträgerquerschnitt Dehnmessstreifen zur Messung von N , M_y , und M_z positioniert wurde. Bei Q5-Q6 beispielsweise wurde je ein DMS am Ober- (Q6) und Untergurt (Q5) angebracht, um die Normalkraft N und das Biegemoment M_y auswerten zu können.

Zusätzlich eingefügte Punkte wurden danach aufsteigend nummeriert (Abb. 2.5).

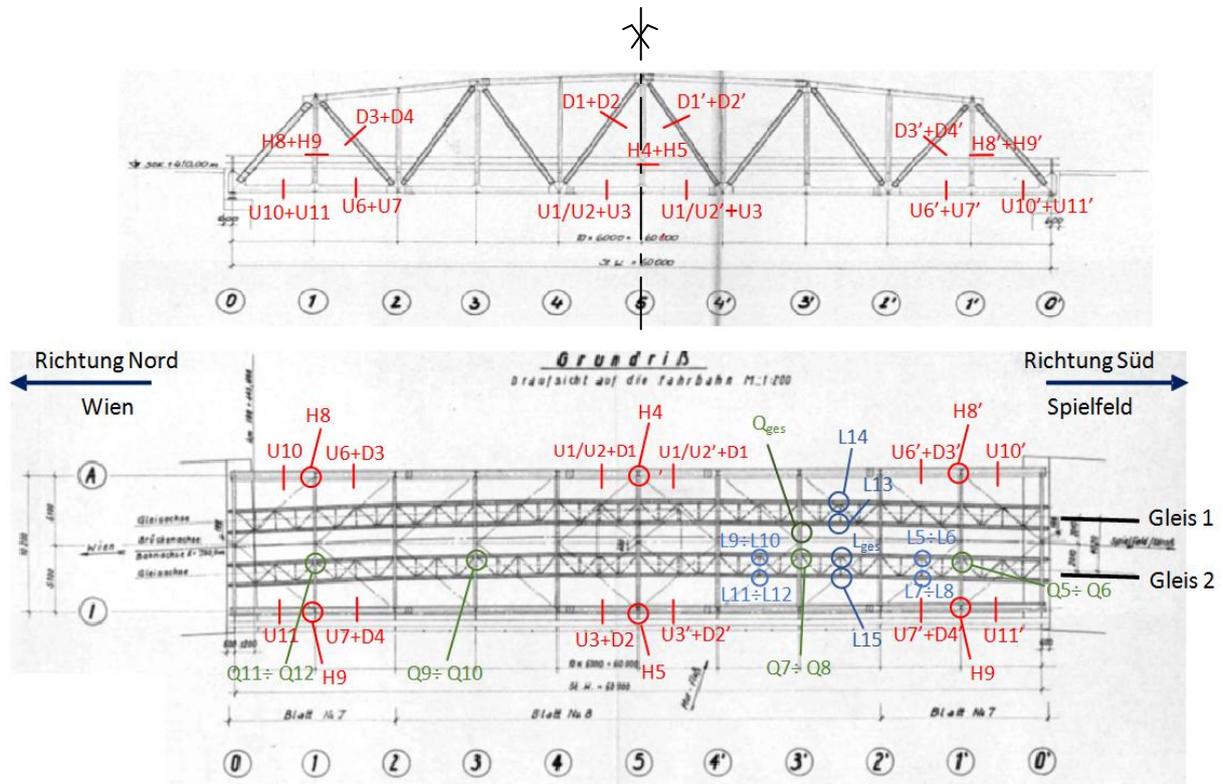


Abb. 2.5: Punkte der Voruntersuchung

Die genaueren Untersuchungen wurden danach an zwölf Punkten durchgeführt, was für aussagekräftige Ergebnisse ausreichend ist. Es wurden zwei Untergurte, zwei Diagonalen und ein Pfosten je Fachwerkträger, der Querträger in der Achse 3', sowie ein Punkt am äußeren Längsträger des innenliegenden Gleispaars ausgewählt (Abb. 2.6).

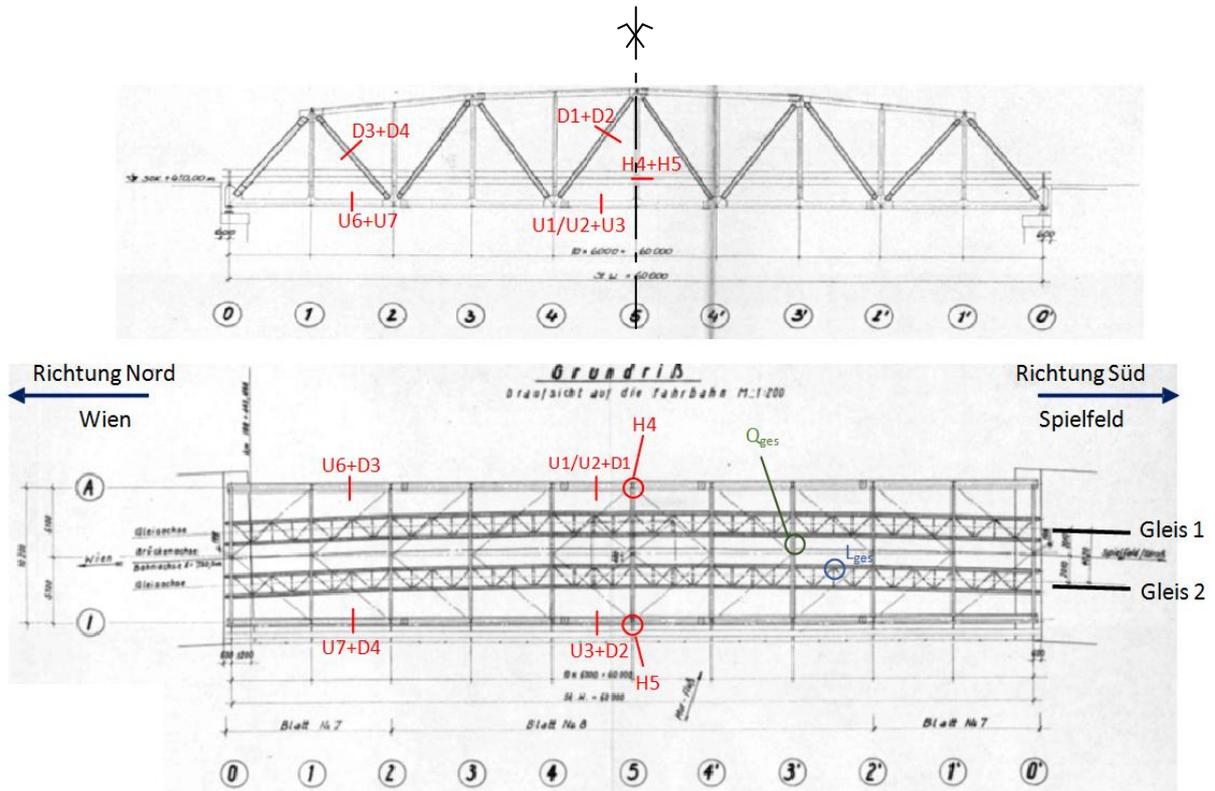


Abb. 2.6: Punkte für die Auswertung der Berechnungsergebnisse

Abb. 2.7 zeigt die Querschnitte der untersuchten Punkte. Wie zu sehen ist sind die Untergurte als Doppel-T-Träger, die untersuchten Pfosten, Längsträger und Querträger als I-Profile und die Diagonalen als Kasten- oder I-Querschnitt ausgeführt.

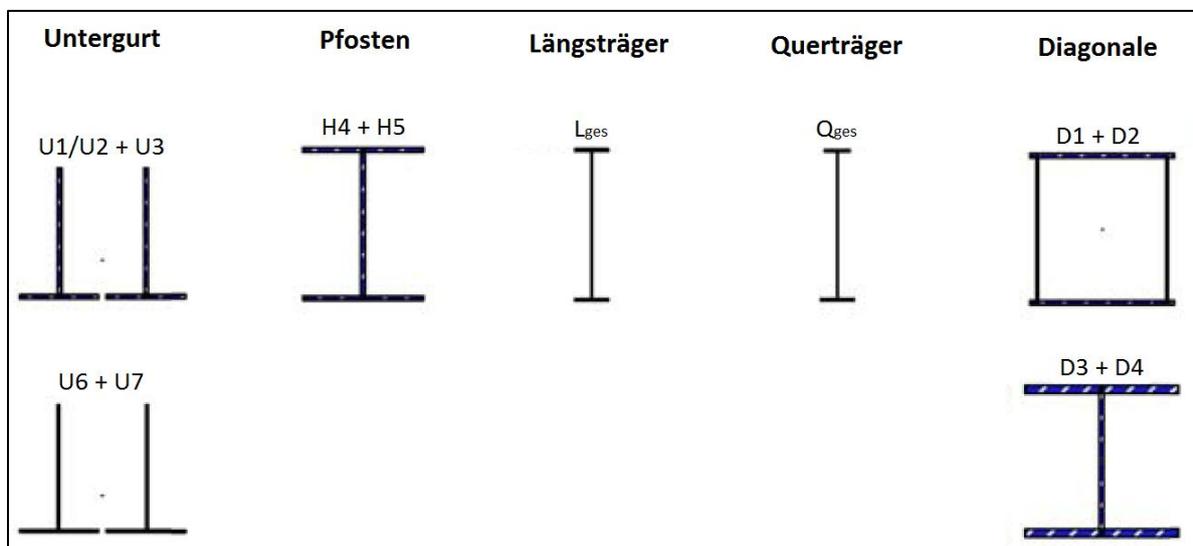


Abb. 2.7: Querschnitte der untersuchten Punkte

3 Lastmodelle

3.1. *Allgemeines*

Wie schon in 2.2 angesprochen werden bei Eisenbahnbrücken in nahezu allen Fällen die Ermüdungsnachweise maßgebend. Im Laufe der Lebensdauer dieser Brücken - üblicherweise 100 Jahre - entstehen viele Millionen Lastwechsel. Deswegen haben auch kleine Ungenauigkeiten in der Lastannahme große Auswirkungen auf die Lebensdauer. Weil vor allem bei alten Brücken die Ermüdungsnachweise nicht mehr erfüllt werden können und daher keine Restlebensdauer prognostiziert werden kann, entsteht ein Verbesserungspotential in Hinblick auf genauere Lastmodelle, welche die jeweiligen Streckenbelastungen exakt erfassen. Aufgrund des Nachweisformates mit den Wöhlerlinien und deren logarithmischen Beziehungen können auch kleine Änderungen des Lastniveaus große Auswirkungen auf die Lebensdauer haben. Im Folgenden werden zwei Lastmodelle vorgestellt, auf deren Basis dargestellt werden soll, wie groß diese Änderungen sein können.

Da die Lebensdauer von Stahlbrücken überwiegend von der Ermüdung bestimmt wird, wird in dieser Arbeit eine mögliche Verbesserung der Ermüdungsnachweise behandelt. Weil in diese nur Veränderungen der Spannungen, sogenannte Spannungsspiele, eingehen, können ständige Lasten, wie etwa das Eigengewicht der Brücke, völlig außer Acht gelassen werden.

3.2. *„Normenlastenzug UIC“ Lastmodell 71*

Üblicherweise wird für Ermüdungsnachweise das Lastmodell 71 aus der EN-1991-2 verwendet um die Bauteilbelastung zu ermitteln. Dieses Modell benötigt keine 3D-Modellierung und kann auch ohne aufwendige EDV-Unterstützung berechnet werden. Deshalb wird dieses Modell auch in der Praxis häufig verwendet, allerdings sind die Ergebnisse teils sehr konservativ.

Grundprinzip dieses Modells ist es den vordefinierten Lastenzug aus **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** für jeden Bauteil der Brücke ungünstigst aufzustellen, um die maximal und die minimal mögliche Spannung zu ermitteln. Diese Spannungsdifferenz bildet die Basis der Berechnungen und wird danach mit mehreren Faktoren multipliziert, um der Realität angepasst zu werden. Dadurch werden die Art der Konstruktion, Anzahl und Gewicht der Züge, sowie die angestrebte Lebensdauer berücksichtigt. Am Ende dieser Modifizierungen steht ein schadensäquivalentes Einstufenkollektiv, welches mit der Wöhlerlinie des maßgebenden Kerbfalls des Bauteils verglichen wird.

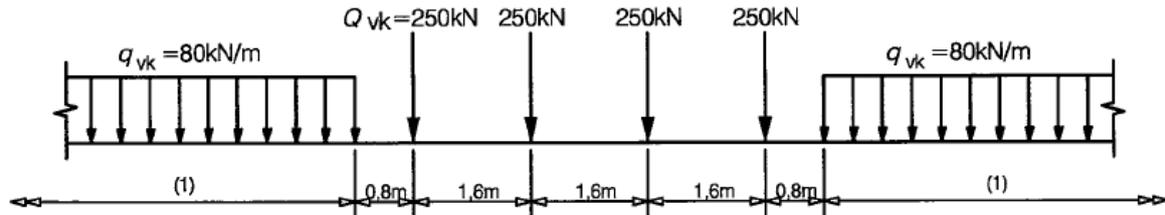


Abb. 3.1: Normenlastenzug ^[2]

3.2.1 Nachweisformat Lastmodell 71

$$\gamma_{FF} * \Delta\sigma_{71} * \Phi_2 * \lambda \leq \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}} \quad (3.1)$$

- γ_{FF} Teilsicherheitsbeiwert für Ermüdungslasten
- $\Delta\sigma_{71}$ maximale Spannungsschwingbreite aufgrund des Lastmodells 71
- Φ_2 dynamischer Beiwert
- λ Beiwert des Schadensäquivalents für Ermüdung
- $\Delta\sigma_c$ Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit
- γ_{Mf} Teilsicherheitsbeiwert für Ermüdungsfestigkeit

$$\lambda = \lambda_1 * \lambda_2 * \lambda_3 * \lambda_4 \quad (3.2)$$

- λ_1 Spannweitenbeiwert, berücksichtigt Typ der Einflusslinie und den der Spannungsberechnung zugrundeliegenden Verkehr
- λ_2 Verkehrsstärkebeiwert
- λ_3 Nutzungsdauerbeiwert
- λ_4 berücksichtigt die Anzahl der Gleise auf einer Brücke

Die Ermittlung des dynamischen Beiwerts Φ_2 wird in Abschnitt 3.4 beschrieben.

3.3. **Lastmodell Betriebszüge**

Eine Alternative bietet das Lastmodell Betriebszüge für Achslasten $\leq 22,5$ t ebenfalls aus der EN-1991-2. Bei diesem Modell wird die Überfahrt von acht verschiedenen Zugstypen über die Brücke simuliert. Die Schädigung jedes Zuges wird mithilfe einer vorgegebenen Verkehrszusammenstellung (Abb. 3.10) auf die Lebensdauer aufgerechnet und danach ein schadensäquivalentes Einstufenkollektiv gebildet, welches mit der entsprechenden Wöhlerlinie in eine Lebensdauer umgerechnet werden kann. Dafür sind jedoch eine 3D-Modellierung in einem geeigneten Berechnungsprogramm und ein hoher Auswertungsaufwand nötig. Dieses Lastmodell liefert zwar genauere Ergebnisse, aufgrund des hohen Aufwandes ist dessen Anwendung für Neubauten aber meist nicht sinnvoll.

Die folgenden Abbildungen (Abb. 3.3 bis Abb. 3.9) zeigen die Betriebszüge, welche für die Berechnung verwendet wurden.

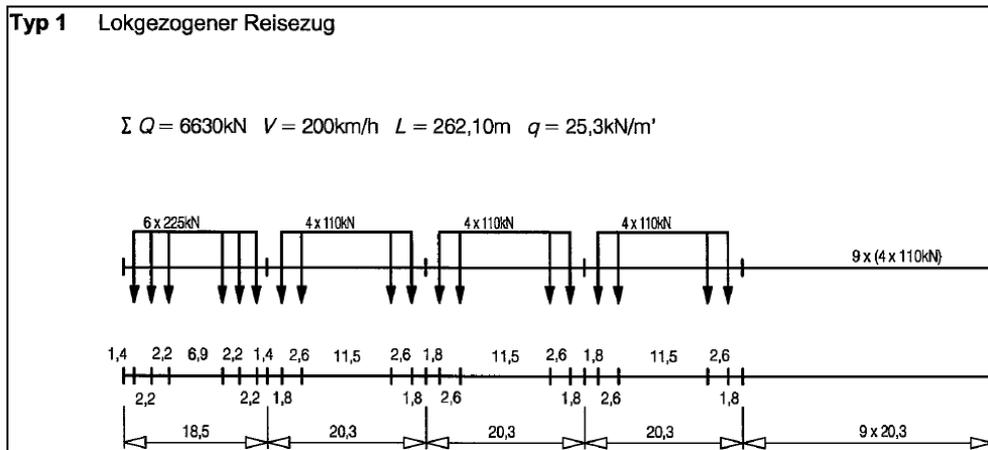


Abb. 3.2: Typ 1, lokgezogener Reisezug [2, Seite 138]

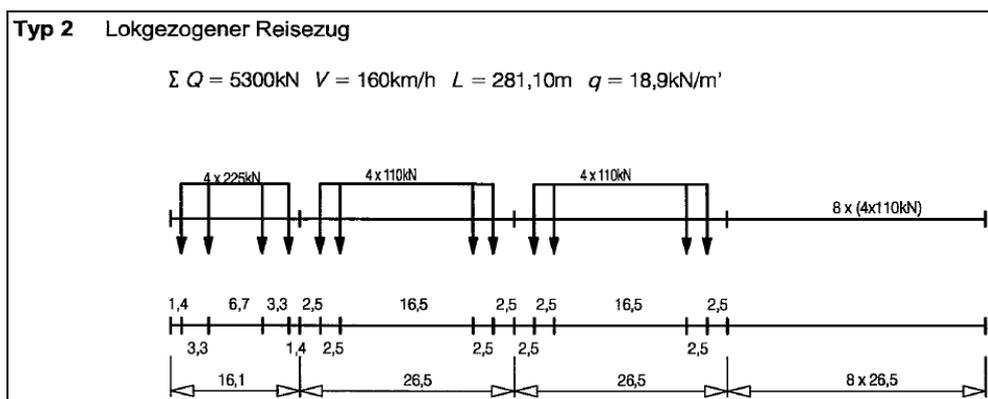


Abb. 3.3: Betriebszug Typ 2 Lokgezogener Reisezug [2, Seite 138]

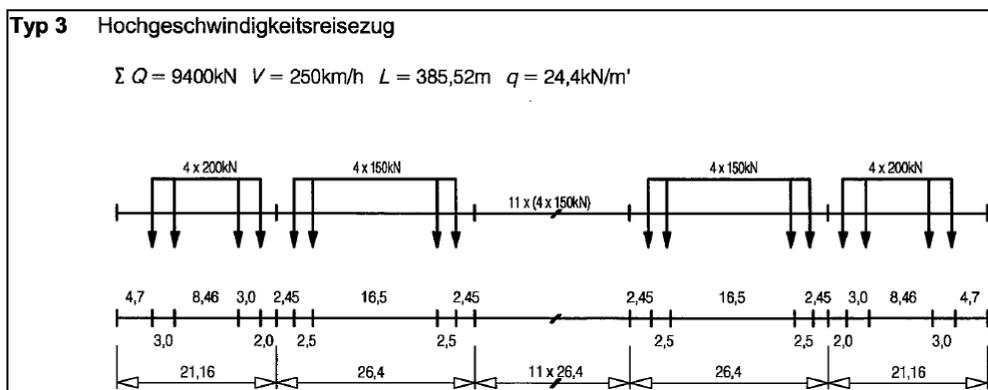


Abb. 3.4: Typ 3, Hochgeschwindigkeitsreisezug [2, Seite 138]

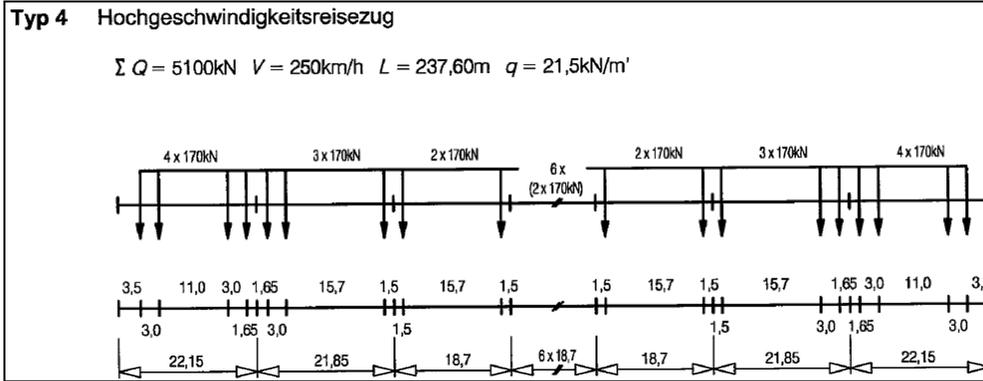


Abb. 3.5: Typ 4, Hochgeschwindigkeitsreisezug [2, Seite 139]

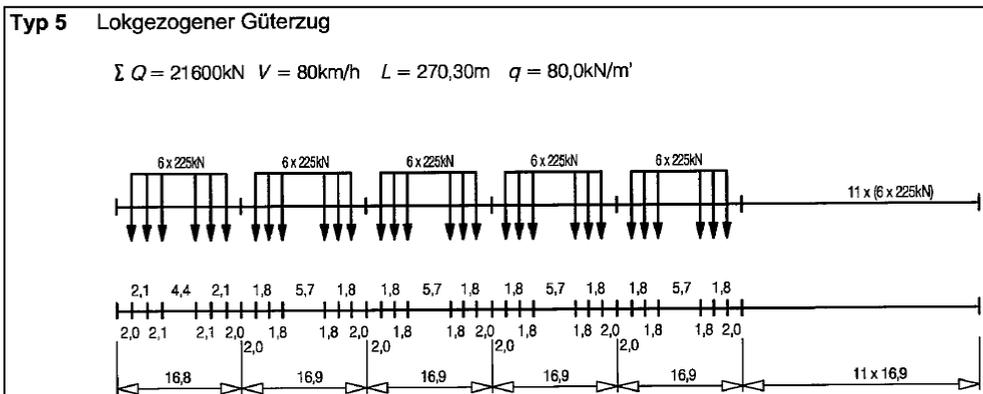


Abb. 3.6: Typ 5, lokgezogener Güterzug [2, Seite 139]

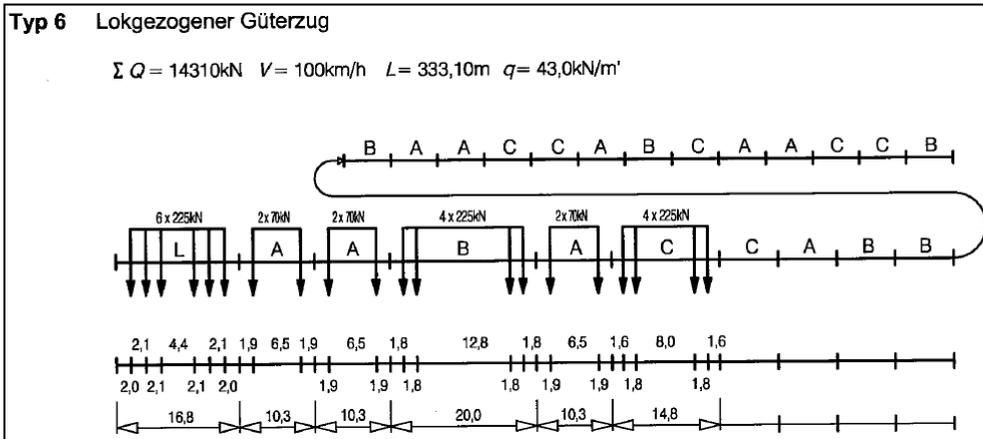


Abb. 3.7: Typ 6, lokgezogener Güterzug [2, Seite 139]

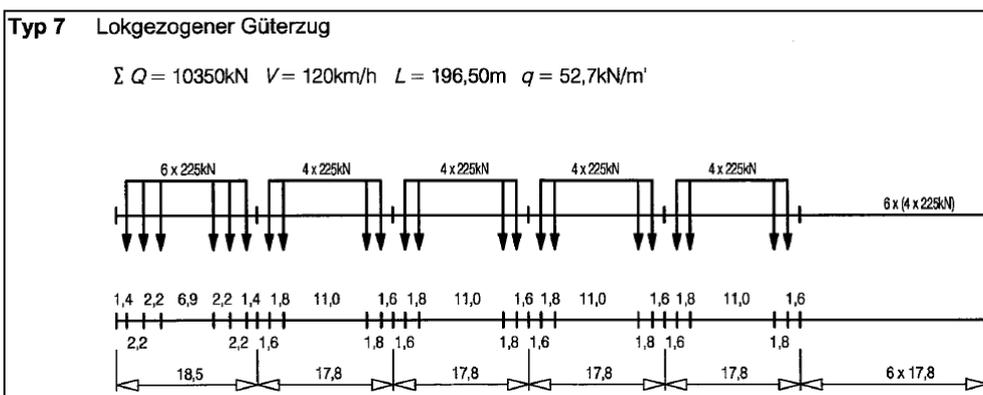


Abb. 3.8, Typ 7, lokgezogener Güterzug [2, Seite 140]

3.3.1 Nachweisformat Lastmodell Betriebszüge

$$\gamma_{FF} * \Delta\sigma_e * \Phi_{BZ} \leq \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}} \quad (3.4)$$

- γ_{FF} Teilsicherheitsbeiwert für Ermüdungslasten
 $\Delta\sigma_e$ schadensäquivalente Spannungsschwingbreite aufgrund Lastmodell Betriebszüge
 Φ_{BZ} dynamischer Beiwert
 $\Delta\sigma_c$ Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit
 γ_{Mf} Teilsicherheitsbeiwert für Ermüdungsfestigkeiten

3.4. *Dynamische Betriebsfaktoren Φ_2 und Φ_{BZ}*

„Der dynamische Beiwert Φ berücksichtigt die dynamische Vergrößerung von Beanspruchungen und Schwingungen im Tragwerk, aber nicht die aus Resonanz und übermäßigen Schwingungen der Brücke.“ [2, Seite 77]

Konkret werden die statischen Achslasten der Lastmodelle erhöht und somit dynamische Einflüsse der Überfahrt berücksichtigt. Beide Faktoren sind abhängig von der Konstruktionsart der Brücke, welche in Form der Länge L_φ berücksichtigt wird, Φ_{BZ} wird zusätzlich noch von der Geschwindigkeit der Betriebszüge beeinflusst. Da Φ_2 den extremsten Grenzfall für einen Bauteil darstellen soll, wäre dieser Beiwert für das Lastmodell der Betriebszüge viel zu hoch, weshalb Φ_{BZ} anders berechnet wird.

Φ_2 errechnet sich dabei aus:

$$\Phi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{L_\varphi} - 0,2} + 0,82 \quad (3.5)$$

mit $1 \leq \Phi_2 \leq 1,67$

Φ_{BZ} berechnet sich aus:

$$\Phi_{BZ} = 1 + \frac{1}{2} * (\varphi' + \frac{1}{2} * \varphi'') \quad (3.6)$$

$$\varphi' = \frac{K}{1 - K + K^4} \qquad \varphi'' = 0,56e \frac{L^2}{100}$$

mit:

$$K = \frac{v}{160} \quad \text{für } L \leq 20 \text{ m}$$

$$K = \frac{v}{47,16L^{0,408}} \quad \text{für } L > 20 \text{ m}$$

Dabei ist

v..... die Höchstgeschwindigkeit, in m/s;

L die maßgebende Länge L_ϕ , in m

Die Werte von L_ϕ und L_{EN} für den konkreten Fall der Kugelsteinbrücke werden in Abschnitt 4.3 berechnet und dargestellt.

4 Berechnung

4.1. *Berechnung Lastmodell 71*

Die Norm besagt bei der Berechnung des Lastmodells 71, dass der Normenlastenzug ungünstigst für alle Bauteile aufzustellen ist, um eine maximale und eine minimale Spannung zu erhalten. Auch müssen die Lasten bereichsweise ausgenommen werden, sollten sie günstige Auswirkungen haben.

Wie bereits erwähnt, ist die Generierung eines 3D-Modells bei der Berechnung des Lastmodells 71 nicht unbedingt erforderlich. Um jedoch einen möglichst unverzerrten Vergleich der beiden Lastmodelle zu ermöglichen wurde auch das Lastmodell 71 am bereits vorhandenen 3D-Modell berechnet. Für alle Bauteile wurden die Überfahrtssimulationen auf jeweils beiden Gleisen durchgeführt.

Da für viele Bauteile der Brücke die Vollaufstellung des Lastenzugs maßgebend ist, wurde als erstes der gesamte Lastenzug generiert und mithilfe des Zusatzmoduls RSBeweg von RSTAB über die Brücke geschoben. Für die feldweise Aufstellung der Lasten anhand der Einflusslinie wurde die Brücke als starrer Durchlaufträger betrachtet und die erforderlichen Lastfälle manuell eingegeben. Da die daraus resultierenden Ergebnisse teils nicht zufriedenstellend waren, wurde auch hier mithilfe des Zusatzmoduls RSBeweg eine automatisierte Lastaufstellung generiert (Anhang A) und die Ergebnisse für die Einzelbauteile ausgelesen. Da die Vollaufstellung des Lastenzugs bereits generiert war, diente diese nun der Überprüfung der neu generierten Lastfälle.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wurde außerdem noch eine Einflusslinienberechnung mit einer „1“-Last von 100kN (Anhang B) für alle Bauteile durchgeführt, anhand dieser die Lastaufstellung nochmals kontrolliert wurde. Da auch diese Überprüfung die Richtigkeit der Ergebnisse bestätigte, wurden diese danach fertig ausgewertet.

4.1.1 Lastaufstellung für Untergurt U1/U2 und U3

Anhand der erstellten Einflusslinie in

Abb. 4.1 ist zu sehen, dass für U1/U2 eine Vollaufstellung des Normenlastenzugs auf Gleis 1 für die maximale Spannung zufolge einer Normalkraftbeanspruchung maßgebend wird. Die vier Einzellasten, welche die Achslasten eines Triebfahrzeuges darstellen sollen, in Feldmitte aufgestellt. Die minimale Spannung in diesem Punkt tritt auf, wenn sich keine Belastung auf der Brücke befindet.

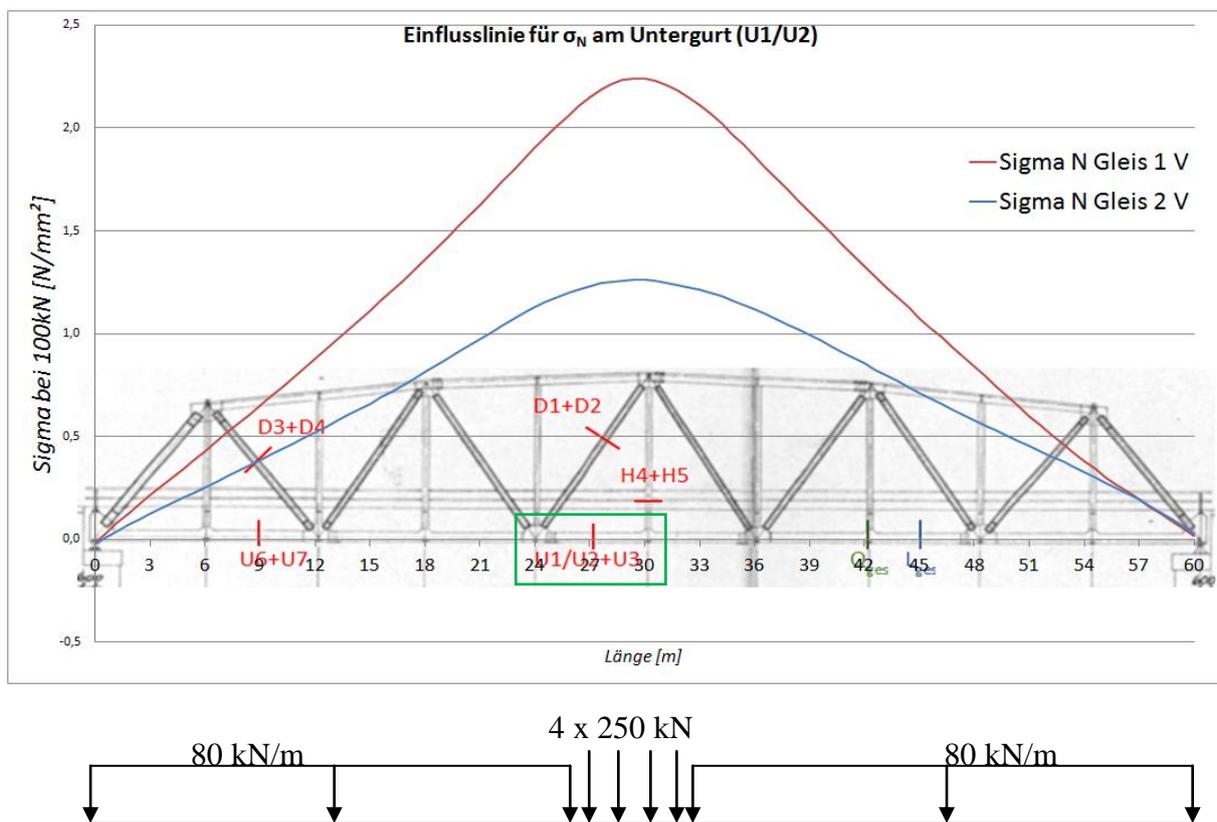


Abb. 4.1: oben: Einflusslinie für Untergurt U1/U2; unten: Aufstellung Normenlastenzug für $\sigma_{x,N,max}$ im Untergurt

Da es sich bei Untergurt U3 um die gleiche Stelle, nur auf der anderen Seite der Brücke handelt und deshalb bei der Einflusslinie nur die beiden Gleise vertauscht sind wird an dieser Stelle auf die Darstellung verzichtet. Die Aufstellung des Lastenzugs ist ebenfalls ident, mit dem Unterschied, dass er auf Gleis 2 gestellt wird.

4.1.2 Lastaufstellung für Untergurt U6 und U7

Anhand der erstellten Einflusslinie in

Abb. 4.2 ist zu sehen, dass für U6 ebenfalls eine Vollaufstellung des Normenlastenzugs auf Gleis 1 für die maximale Spannung zufolge einer Normalkraftbeanspruchung maßgebend wird. Die vier Einzellasten, welche die Achslasten eines Triebfahrzeuges darstellen sollen, werden direkt über den Messpunkt gestellt. Die minimale Spannung in diesem Punkt tritt auf, wenn sich keine Belastung auf der Brücke befindet.

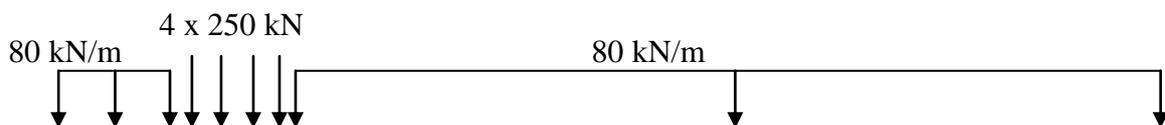
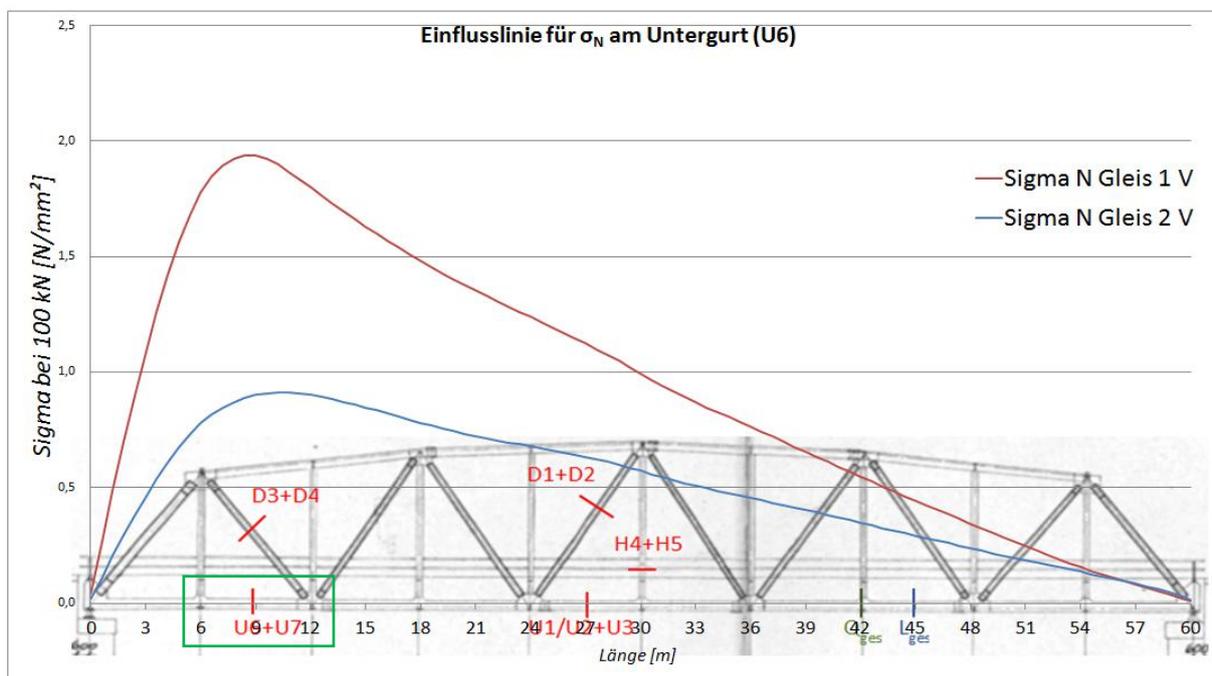


Abb. 4.2: oben: Einflusslinie für Untergurt U6; unten: Aufstellung Normenlastenzug für $\sigma_{x,N,max}$ im Untergurt

Da es sich bei Untergurt U7 um die gleiche Stelle, nur auf der anderen Seite der Brücke handelt und deshalb bei der Einflusslinie nur die beiden Gleise vertauscht sind wird an dieser Stelle auf die Darstellung verzichtet. Die Aufstellung des Lastenzugs ist ebenfalls ident, mit dem Unterschied, dass er auf Gleis 2 gestellt wird.

4.1.3 Lastaufstellung für Pfosten H4 und H5

Anhand der erstellten Einflusslinie in

$\sigma_{x,N,max}$

$\sigma_{x,N,min}$

Abb. 4.3 ist zu sehen, dass für H4 eine bereichsweise Aufstellung des Normenlastenzugs auf Gleis 1 für die maximale Spannung zufolge einer Normalkraftbeanspruchung maßgebend wird. Die vier Einzellasten, welche die Achslasten eines Triebfahrzeuges darstellen sollen, werden direkt über den Messpunkt gestellt. In den Bereichen in denen die Einflusslinie einen positiven Wert aufweist, also auf beiden Seiten der Einzellasten, sowie an den beiden Enden der Brücke wird die Streckenlast von 80 kN/m aufgestellt. Die minimale Spannung in diesem Punkt tritt auf, wenn sich die Belastung in den zuerst unbelasteten Bereichen befindet. Die entscheidende Einflusslänge des Hauptbereichs beträgt etwa 16 m.

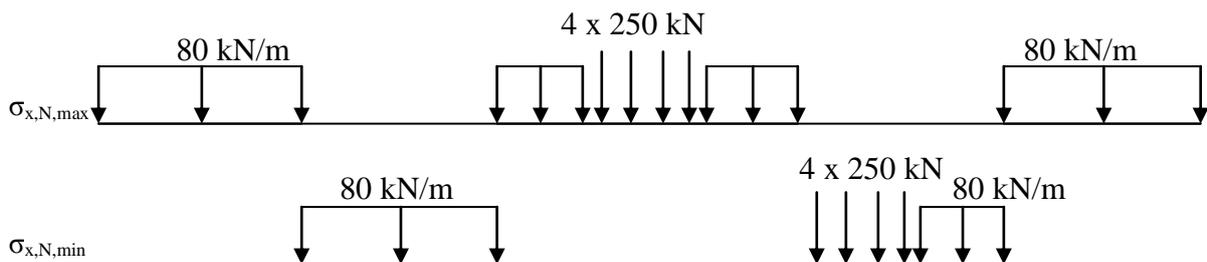
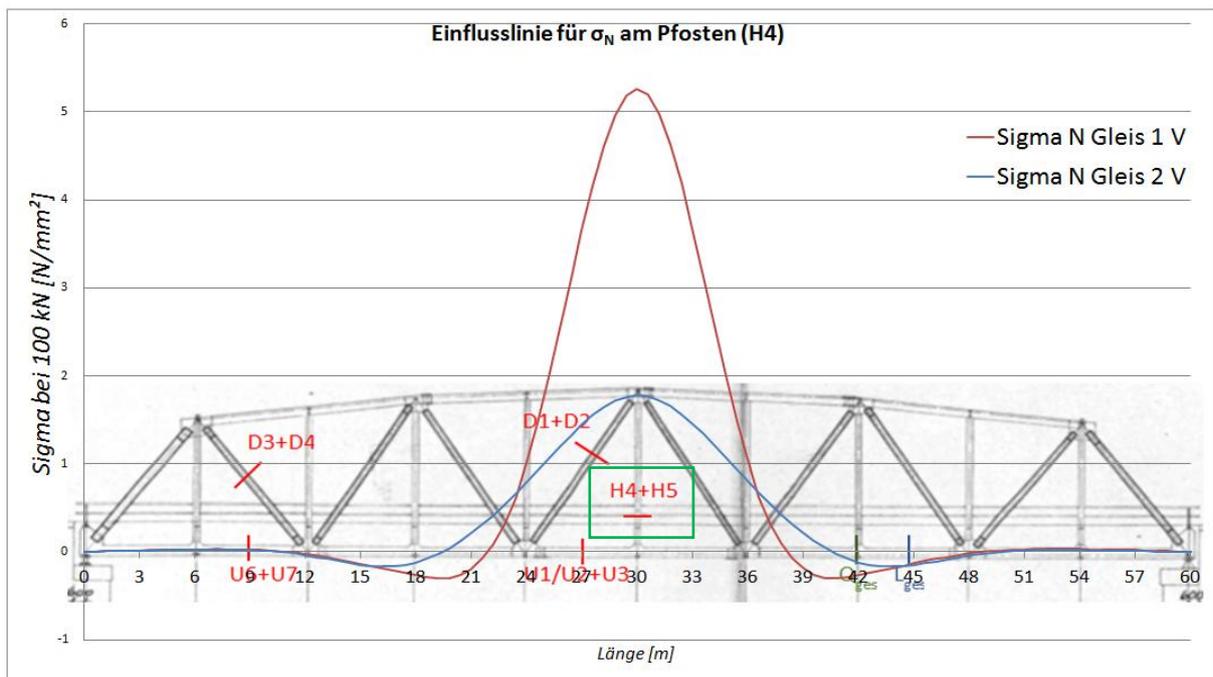
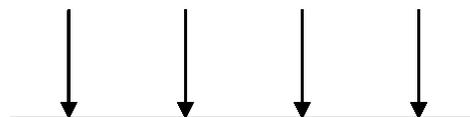
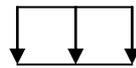


Abb. 4.3: oben: Einflusslinie für Pfosten H4; unten: Aufstellung Normenlastenzug für $\sigma_{x,N,max}$ und $\sigma_{x,N,min}$ im Pfosten;

Da es sich bei Pfosten H5 um die gleiche Stelle auf der anderen Seite der Brücke handelt und deshalb bei der Einflusslinie nur die beiden Gleise vertauscht sind wird an dieser Stelle auf die Darstellung verzichtet. Die Aufstellung des Lastenzugs ist ebenfalls ident, mit dem Unterschied, dass er auf Gleis 2 gestellt wird.



4.1.4 Lastaufstellung für Längsträger L_{ges}

Anhand der erstellten Einflusslinie in

$\sigma_{x,max}$

$\sigma_{x,min}$

Abb. 4.4 ist zu sehen, dass für L_{ges} eine bereichsweise Aufstellung des Normenlastenzugs auf Gleis 2 für die maximale Spannung zufolge Normalkraft- und Momentenbeanspruchung M_y maßgebend wird. Die vier Einzellasten, welche die Achslasten eines Triebfahrzeuges darstellen sollen, werden direkt über den Messpunkt gestellt. In den Bereichen in denen die Einflusslinie einen positiven Wert aufweist, also auf beiden Seiten der Einzellasten, sowie auf der linken Hälfte der Brücke wird die Streckenlast von 80 kN/m aufgestellt. Die minimale Spannung in diesem Punkt tritt auf, wenn sich die Belastung in den zuerst unbelasteten Bereichen befindet. Die vier Einzellasten werden dabei in den Bereich mit dem größten negativen Ausschlag gestellt. Die Einflusslänge des Hauptbereichs beträgt etwa acht Meter.

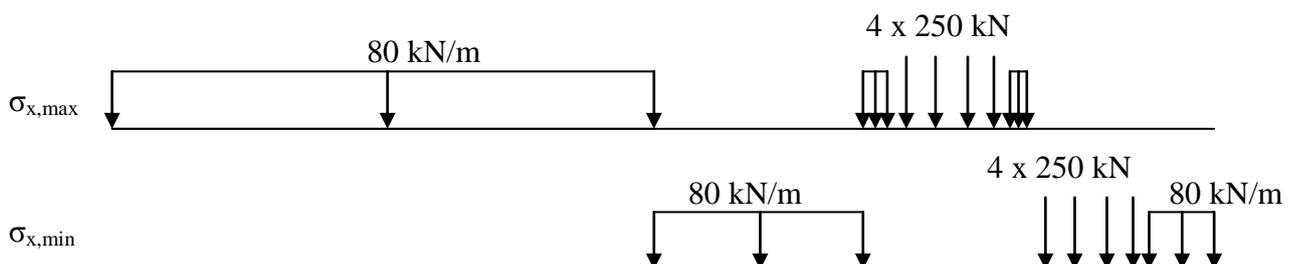
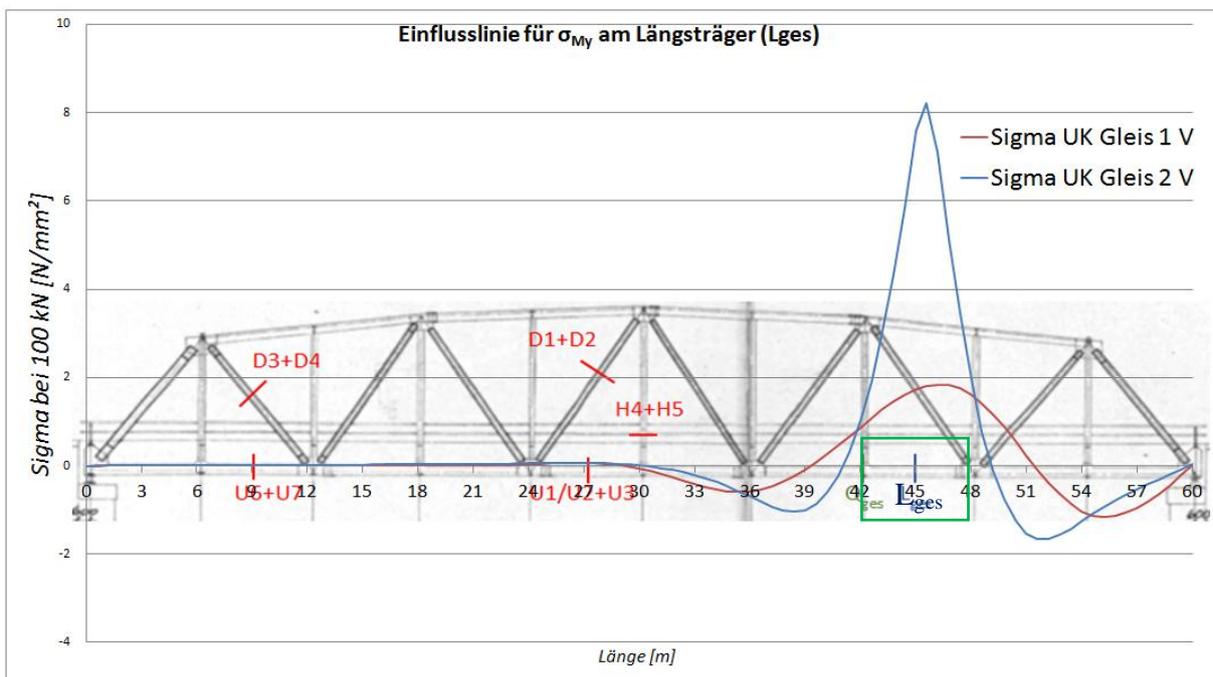
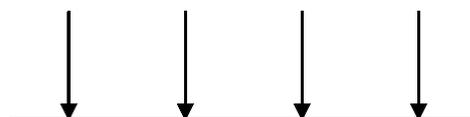
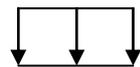


Abb. 4.4: oben: Einflusslinie für Längsträger L_{ges} ; unten: Aufstellung Normenlastenzug für $\sigma_{x,max}$ und $\sigma_{x,min}$ im Längsträger



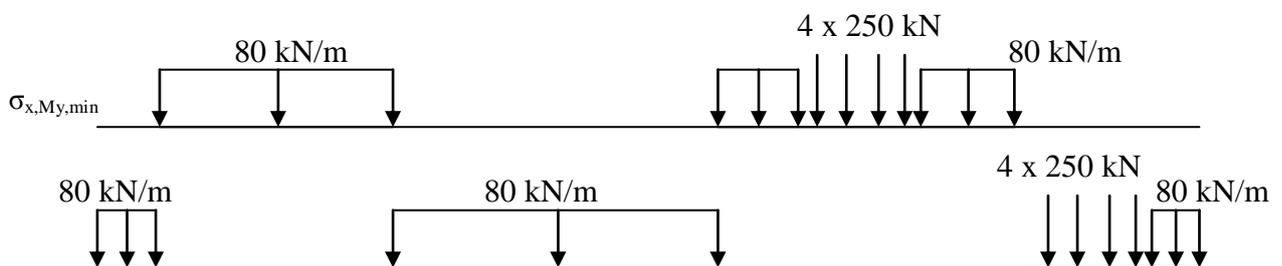
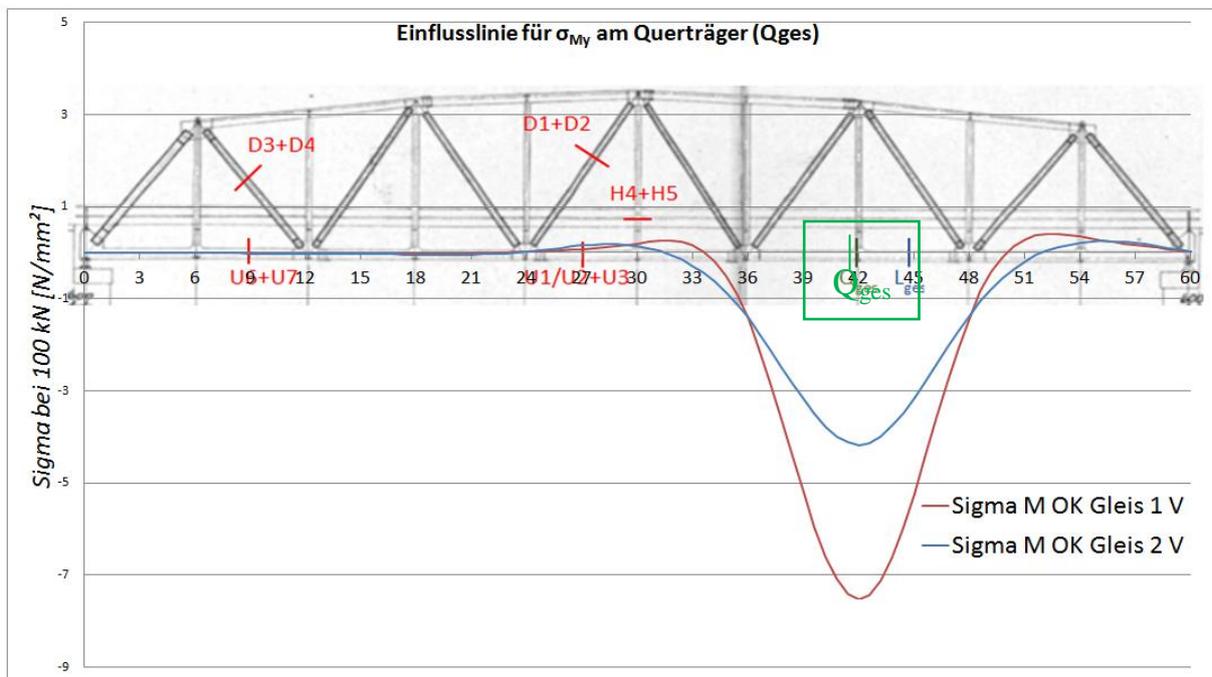
4.1.5 Lastaufstellung für Querträger Q_{ges}

Anhand der erstellten Einflusslinie in

$\sigma_{x,My,min}$

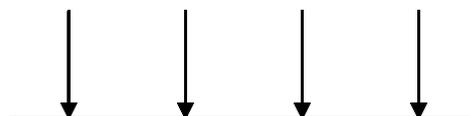
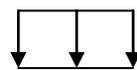
$\sigma_{x,My,max}$

Abb. 4.5 ist zu sehen, dass für Q_{ges} eine bereichsweise Aufstellung des Normenlastenzugs auf Gleis 1 für die minimale Spannung zufolge des Biegemoments M_y am Obergurt des Querträgers in der Achse des Steges maßgebend wird. Die vier Einzellasten, welche die Achslasten eines Triebfahrzeuges darstellen sollen, werden direkt über den Messpunkt gestellt. In den Bereichen in denen die Einflusslinie einen negativen Wert aufweist, also auf beiden Seiten der Einzellasten, sowie in einem Bereich der linken Hälfte der Brücke, wird die Streckenlast von 80 kN/m aufgestellt. Die maximale Spannung in diesem Punkt tritt auf, wenn sich die Belastung in den zuerst unbelasteten Bereichen befindet. Die vier Einzellasten werden dabei in den Bereich mit dem größten negativen Ausschlag gestellt. Die Einflusslänge des Hauptbereichs beträgt etwa 16 m.



$\sigma_{x,My,max}$

Abb. 4.5: oben: Einflusslinie für Querträger Q_{ges} ; unten: Aufstellung Normenlastenzug für $\sigma_{x,My,max}$ und $\sigma_{x,My,min}$ im Querträger



4.1.6 Lastaufstellung für Diagonalstab D1 und D2

Anhand der erstellten Einflusslinie in

$\sigma_{x,N,max}$

$\sigma_{x,N,min}$

Abb. 4.6 ist zu sehen, dass für D1 eine nahezu halbseitige Aufstellung des Normenlastenzugs auf Gleis 1 für die maximale Spannung zufolge einer Normalkraftbeanspruchung maßgebend wird. Die vier Einzellasten, welche die Achslasten eines Triebfahrzeuges darstellen sollen, werden beim höchsten Ausschlag der Einflusslinie aufgestellt. Die Streckenlast von 80 kN/m wird neben den Einzellasten aufgestellt, bis zum Nulldurchgang der Einflusslinie. Die minimale Spannung in diesem Punkt tritt auf, wenn sich die Belastung auf der zuerst unbelasteten Seite befindet. Die vier Einzellasten werden wiederum im Bereich des höchsten Ausschlags aufgestellt. Die Einflusslänge des Hauptbereichs beträgt etwa 27 m.

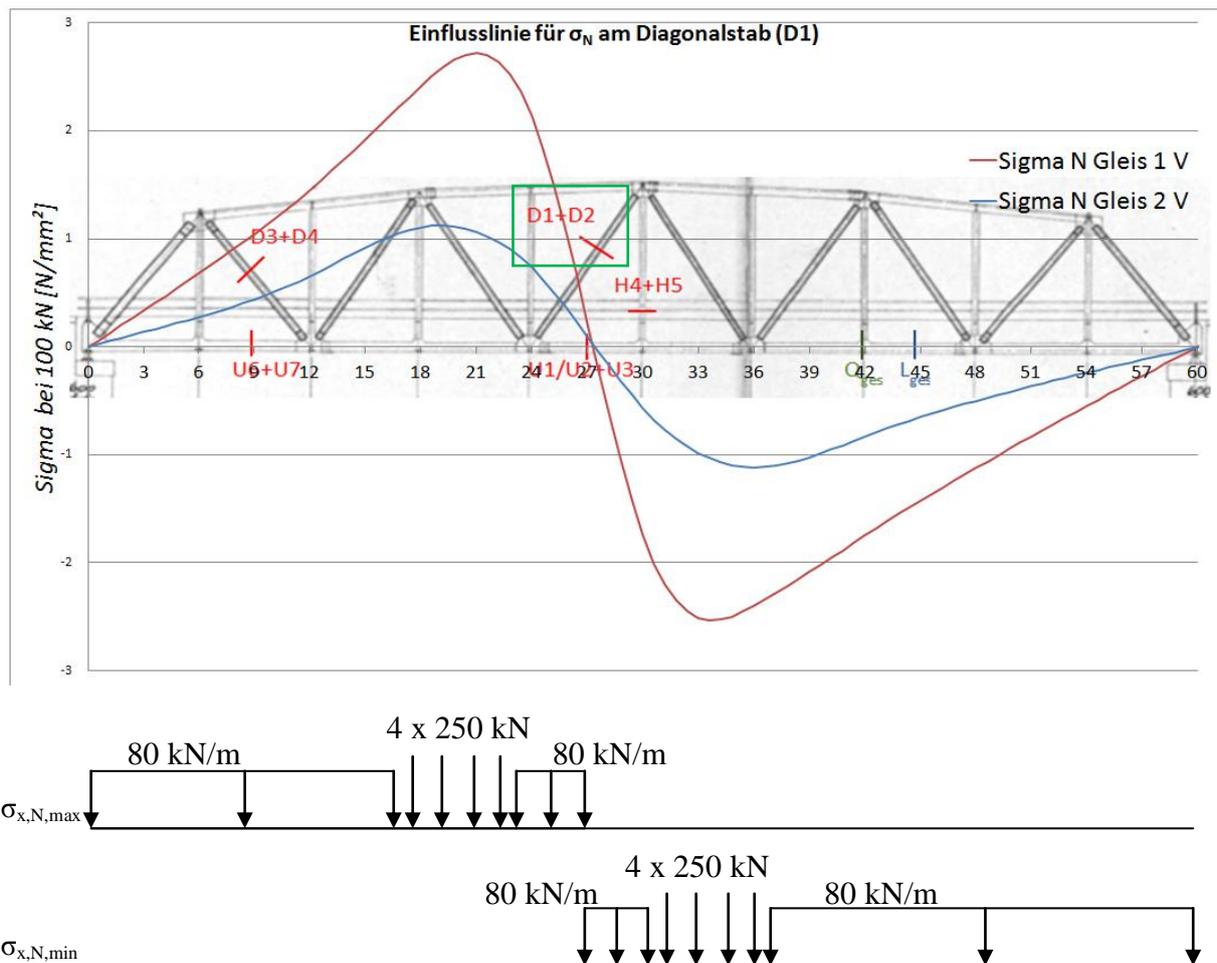


Abb. 4.6: oben: Einflusslinie für Diagonale D1; unten: Aufstellung Normenlastenzug für $\sigma_{x,N,max}$ und $\sigma_{x,N,min}$ in der Diagonalen

Da es sich beim Diagonalstab D2 um die gleiche Stelle auf der anderen Seite der Brücke handelt und deshalb bei der Einflusslinie nur die beiden Gleise vertauscht sind wird an dieser Stelle auf die Darstellung verzichtet. Die Aufstellung des Lastenzugs ist ebenfalls ident, mit dem Unterschied, dass er auf Gleis 2 gestellt wird.

4.1.7 Lastaufstellung für Diagonalstab D3 und D4

Anhand der erstellten Einflusslinie in

$\sigma_{x,N,max}$

$\sigma_{x,N,min}$

Abb. 4.7 ist zu sehen, dass für D3 beinahe eine Vollaufstellung des Normenlastenzugs auf Gleis 1 für die maximale Spannung zufolge einer Normalkraftbeanspruchung maßgebend wird. Die vier Einzellasten, welche die Achslasten eines Triebfahrzeuges darstellen sollen, werden beim höchsten Ausschlag der Einflusslinie aufgestellt. Daneben wird die Streckenlast von 80 kN/m in den positiven Bereich der Einflusslinie gestellt. Die minimale Spannung in diesem Punkt tritt auf, wenn die vier Einzellasten in dem zuerst unbelasteten Bereich aufgestellt werden. Die Einflusslänge des Hauptbereichs beträgt etwa 54 m.

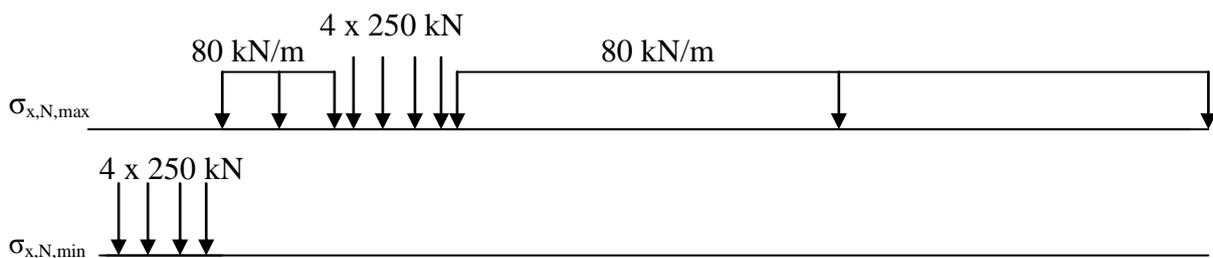
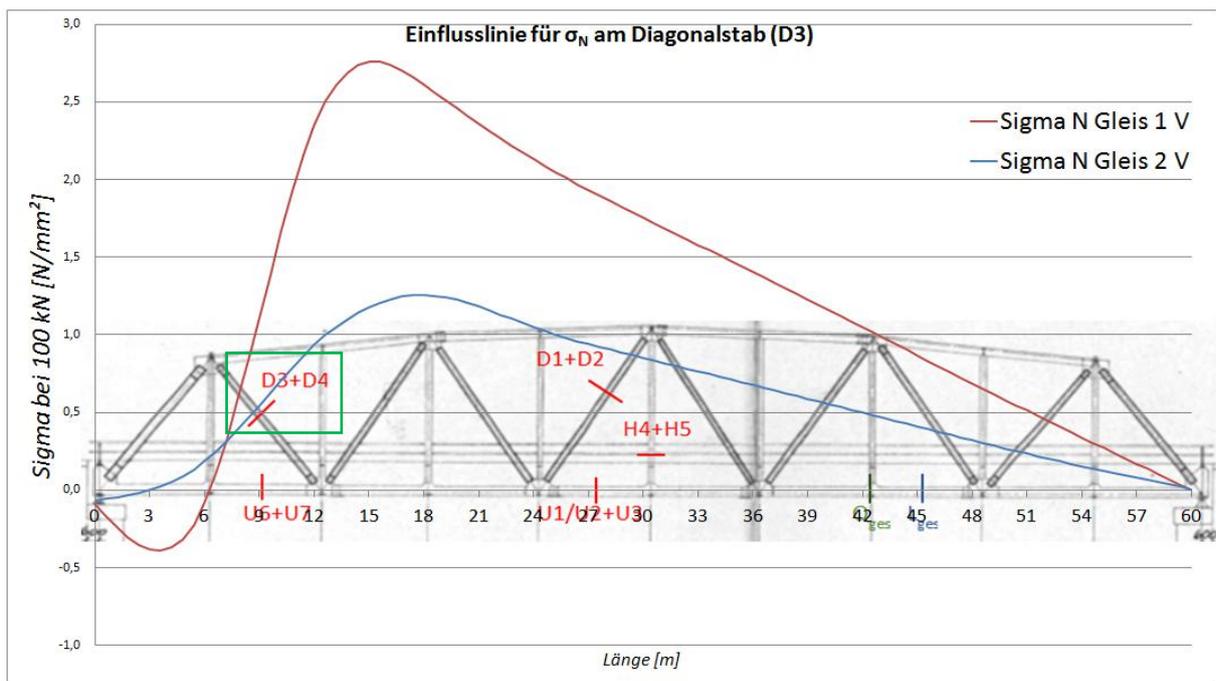
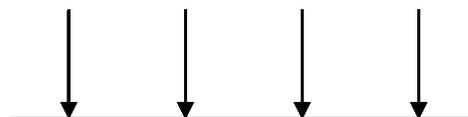
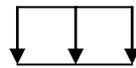


Abb. 4.7: oben: Einflusslinie für Diagonale D3; unten: Aufstellung Normenlastenzug für σ_{max} und σ_{min} in der Diagonalen

Da es sich beim Diagonalstab D4 um die gleiche Stelle auf der anderen Seite der Brücke handelt und deshalb bei der Einflusslinie nur die beiden Gleise vertauscht sind wird an dieser Stelle auf die Darstellung verzichtet. Die Aufstellung des Lastenzugs ist ebenfalls ident, mit dem Unterschied, dass er auf Gleis 2 gestellt wird.



4.2. Berechnung Lastmodell Betriebszüge

Für die Berechnung der Betriebszüge wurden Wanderlasten entsprechend der vertikalen Achslasten der EC-Betriebszüge eins bis acht mithilfe des Zusatzmoduls RSBeweg generiert. Zusätzlich wurde auch ein Lastenzug erzeugt, der die zugehörigen Horizontalkraftbeanspruchungen entsprechend der vertikalen Achsen darstellt, die durch die Gleislage im Bogen auf der Brücke hervorgerufen wird. Die Horizontalkräfte sind Zentrifugalkräfte, welche mit den durch die Erdbeschleunigung g erhöhten statischen Achslasten auf Basis der Zuggeschwindigkeit berechnet wurden.

Daraufhin wurden die Lastenzüge mit dem Zusatzmodul über die Brücke geschoben (Abb. 4.8 bis Abb. 4.10). Dies erfolgt indem man den Lastenzug an den Beginn der Brücke stellt und danach jeweils um einen bestimmten Abstand nach vor schiebt. In diesem Fall wurde der Abstand mit 0,6 m gewählt, da dies dem Abstand der vorhandenen Holzschwellen entspricht. Das Modul schiebt somit den Lastenzug um 60 cm nach vorn und speichert diese Laststellung als neuen Lastfall. Somit entstehen für jeden Lastenzug mehrere hundert Lastfälle. Pro Zugtyp entstehen jeweils einige hundert Lastfälle für die vertikalen Lastenzüge auf Gleis 1 und Gleis 2, sowie nochmals gleich viele für die horizontalen Lastenzüge auf Gleis 1 und Gleis 2. Die horizontalen und vertikalen Lastenzüge wurden getrennt behandelt, da es bei einigen Zugtypen, aufgrund zu vieler Achslasten nicht möglich war, diese in einem zu generieren - Das Zusatzmodul RSBeweg erlaubt max. 100 Einzellasten pro generiertem Wanderlastenzug (Betriebszug Typ 5 weist 96 Achsen auf). Außerdem können so die vertikalen und horizontalen durch die Betriebszüge hervorgerufenen Schnittgrößen getrennt betrachtet und verglichen werden. Weil die Ergebnisse dadurch für reine vertikale Beanspruchung vorhanden sind können diese auch auf gerade Brücken umgelegt werden. Die Horizontalkräfte bewirken ein Moment um die Brückenlängsachse, welches durch ein Kräftepaar in den beiden Hauptfachwerkträgern abgetragen werden muss. Dieses Kräftepaar wirkt auf den bogenäußeren Träger belastend, während der bogeninnere entlastet wird.

Die Abb. 4.8 zeigt die generierten vertikalen Einzellasten des EC-Betriebszuges Typ 5 beispielsweise für den Lastfall 057 am bogenäußeren Gleis 1. Bei Lastfall „001“ befährt die erste Achse des Zuges den Lasteinleitungsträger der Brücke bei $x = 0\text{m}$, beim letzten generierten Lastfall verlässt die letzte Zugachse die Brücke.

4.2.1 Lastenzug Typ 2

Der Aufbau des Lastenzugs des Typs 2 entspricht einem Reisezug mit vorne ziehendem Triebwagen (Abb. 4.11). Seine Länge beträgt insgesamt 281,1 m und seine Überfahrts- geschwindigkeit ist mit 160 km/h festgelegt. Er wurde an dieser Stelle für die Darstellung aus- gewählt, da sein Aufbau und die Geschwindigkeit dem eines typischen Reisezugs entspre- chen.

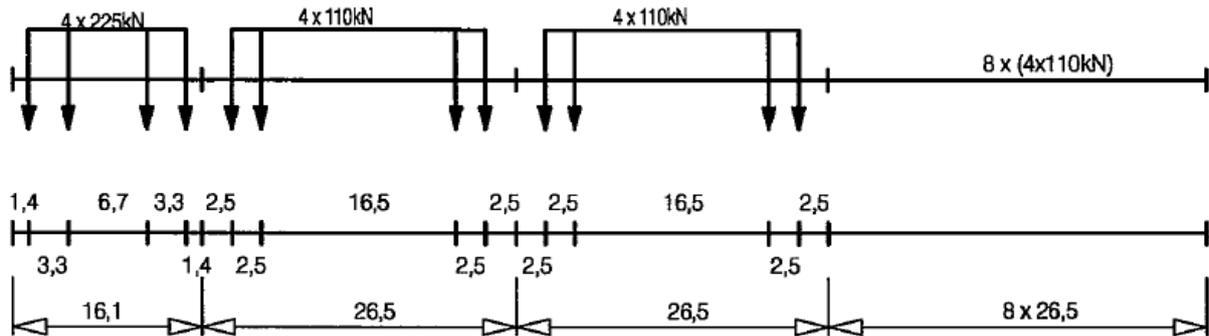


Abb. 4.11: Typ 2, Lokgezogener Reisezug ^[2]

In den folgenden Bildern (Abb. 4.12 bis Abb. 4.23) wird der Spannungsverlauf mit fortschreitendem Zugverschub in den jeweiligen Querschnitten, hervorgerufen durch die Überfahrt des Lastenzugs des Typs 2, dargestellt. Bei den Fachwerkstäben der Hauptträger wurde die Spannung nur aufgrund der Normalkraft im Querschnitt berechnet, im Längsträger ergibt sich der jeweilige Spannungszustand zufolge der Wirkung aus $N + M_y$, im Querträger aus alleiniger Wirkung von M_y .

Die horizontale Achse der Diagramme bezeichnet den Lastfall, aus dem die Spannung resultiert. Da alle 0,6 m ein Lastfall erstellt wurde, muss man die Lastfälle mit 0,6 multiplizieren um den aktuellen Abstand der Zugspitze zum Startpunkt auf der Brücke in Metern zu erhalten. Da die Überfahrt abhängig vom Gleis von verschiedenen Seiten der Brücke startet, kommt es bei einigen Punkten zu horizontalen Verschiebungen der Spannungsspitzen.

Im Abb. 4.12 ist der Spannungsverlauf σ_x zufolge Normalkraft im Untergurt U1/U2 zu sehen. Der Ausschlag zu Beginn der Überfahrt resultiert aus den Achslasten des Triebwagens, das Spannungsniveau danach resultiert aus der Überfahrt der leichteren Waggon. Aufgrund der großen Einflusslänge in diesem Punkt wird durch den Lastenzug nur ein Spannungsspiel hervorgerufen, deshalb haben die einzelnen Achsen keinen großen Einfluss auf die Ermüdungslast. U1/U2 liegt auf der Bogenaußenseite, weshalb die Horizontalkraft die Spannung stark erhöht.

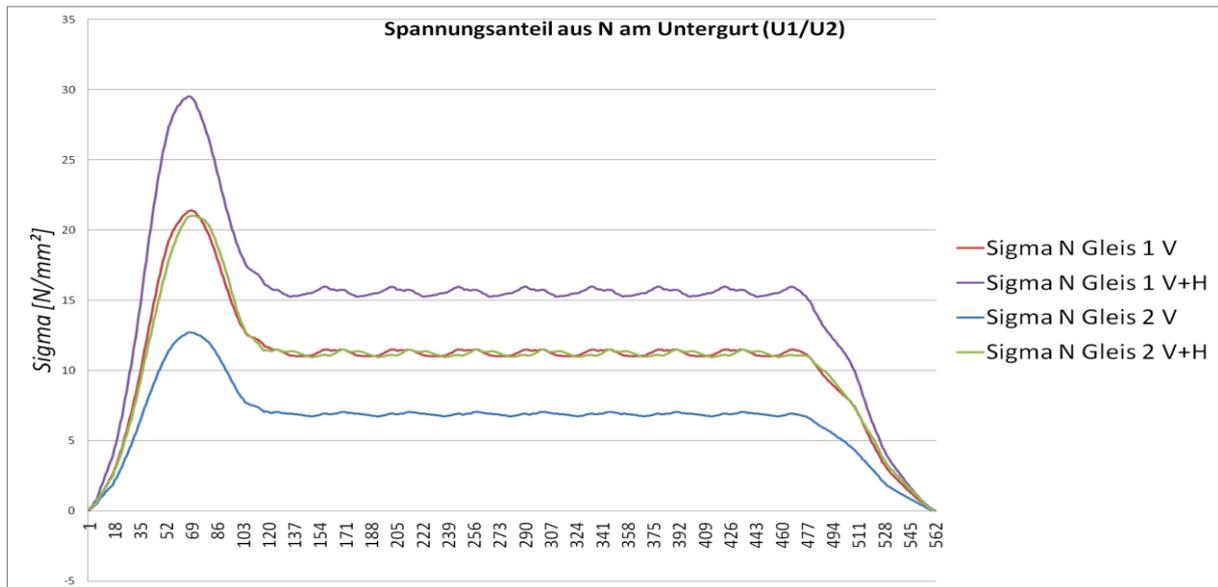


Abb. 4.12: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund der Normalkraft im Untergurt U1/U2

Der Spannungsverlauf von U3 sieht im ersten Moment ident zum vorherigen von U1/U2 aus (Abb. 4.13). Da der Punkt aber auf der anderen Seite der Brücke liegt, hat sich der Einfluss der Gleise verändert. Durch die Nähe des Gleises 2 zum inneren Hauptträger liefert hier die Überfahrt auf Gleis 2 die maßgebende Spannung im Punkt U3. Außerdem liegt U3 auf der Bogeninnenseite, wodurch die Horizontalkraft des Lastenzuges eine Entlastung des Querschnitts zur Folge hat.

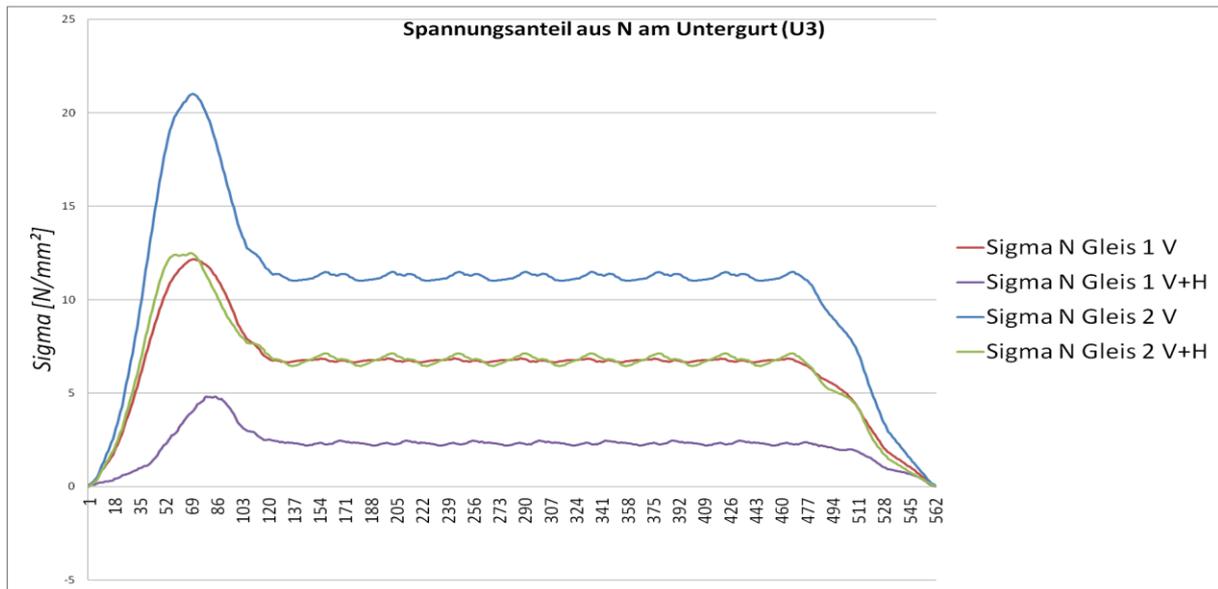


Abb. 4.13: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund der Normalkraft im Untergurt U3

Am Spannungsbild des Untergurts U6 ist zu sehen, dass die Tendenz der Spannungen dieselbe wie bei den Untergurten U1/U2 und U3 ist (Abb. 4.14). Der Doppelausschlag am Beginn der Überfahrt auf Gleis 1 resultiert aus den beiden Doppelachsen des Triebwagens. Auf Gleis 2 verschmilzt dieser zu einem, da an dieser Stelle bereits die gesamte Brücke belastet wird. Durch die leichte Änderung der Einflusslinie bilden sich die Drehgestelle im Spannungs-Lastfallverlauf ab, was zu einer höheren Anzahl an Spannungsspielen im Vergleich zu U1/U2 führt, während $\sigma_{x,N}$ bei der Waggonüberfahrt mit 15 N/mm² ident zu U1/U2 ist. Durch die Horizontalkraft wird die Spannung σ_x zufolge Normalkraft im Untergurt stark erhöht.

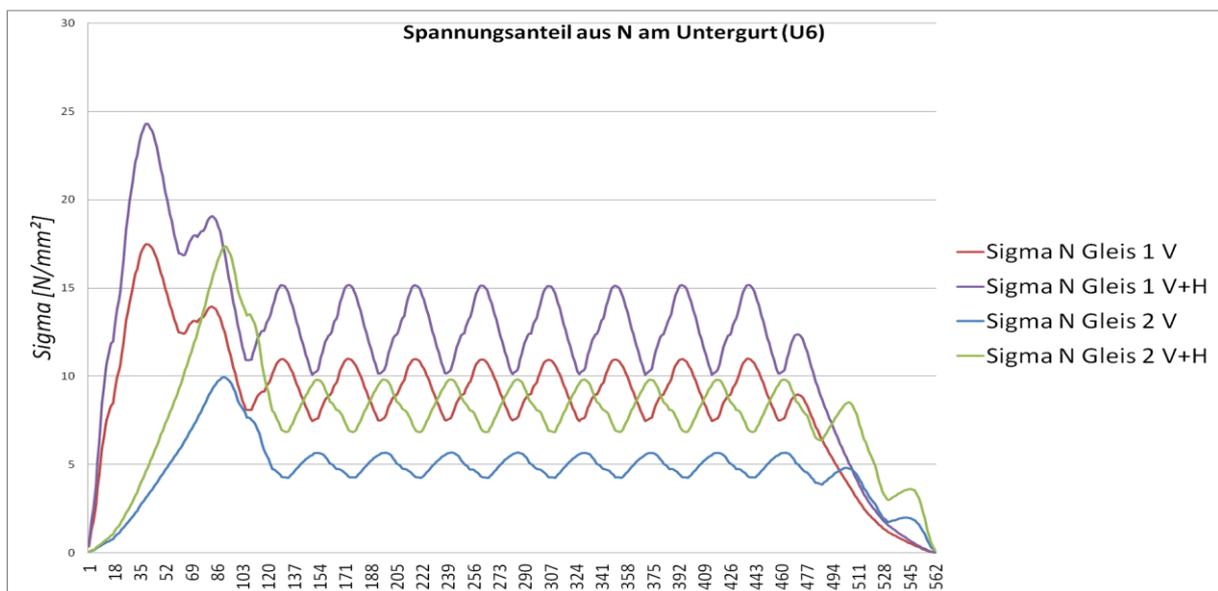


Abb. 4.14: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund der Normalkraft im Untergurt U6

Am Spannungsverlauf am Untergurt U7 erkennt man wieder den Einfluss jedes Drehgestells des Zuges (Abb. 4.15). Hier wirkt die Horizontalkraft günstig auf die Höhe der max. Spannung im Querschnitt.

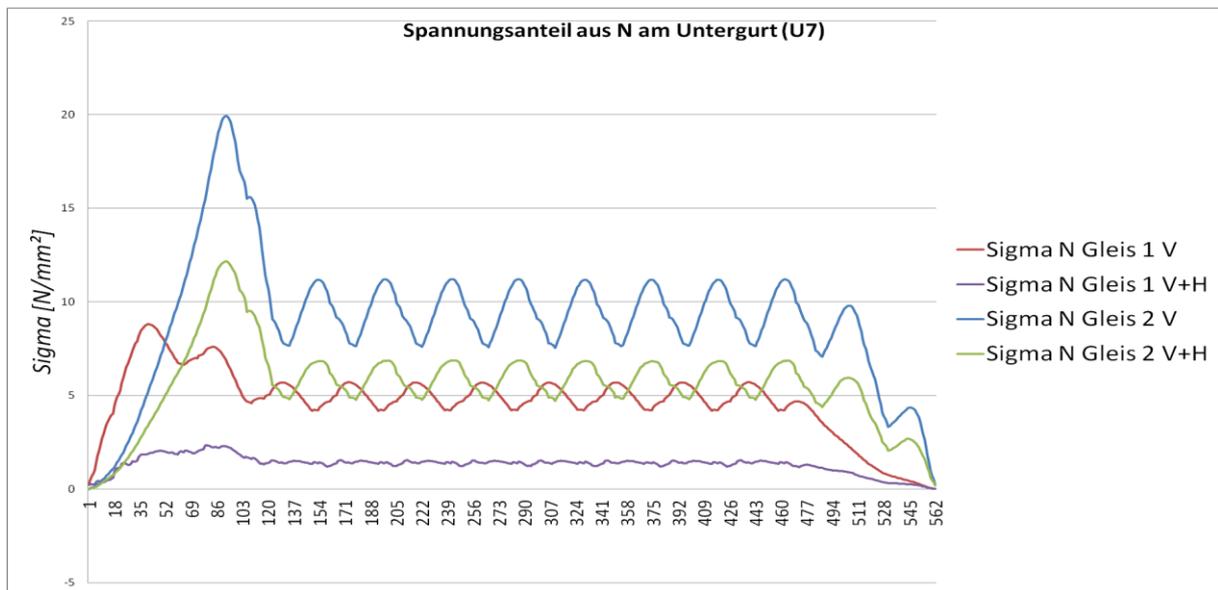


Abb. 4.15: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft am Untergurt U7

Beim Pfosten H4 sieht man bereits am Spannungsverlauf die geringe Einflusslänge (Abb. 4.16). Das vordere Drehgestell des Triebwagens und danach je vier Achsen des Zuges - die beiden hinteren des einen Waggons zusammen mit den beiden vorderen des nächsten - haben eine Spannungsspitze zur Folge, dazwischen geht die Spannung immer auf null zurück oder liegt sogar darunter. Auch der Einfluss der Horizontalkraft hat sich zusammen mit der Einflusslänge stark verringert, jedoch erhöht sie die Spannung weiterhin.

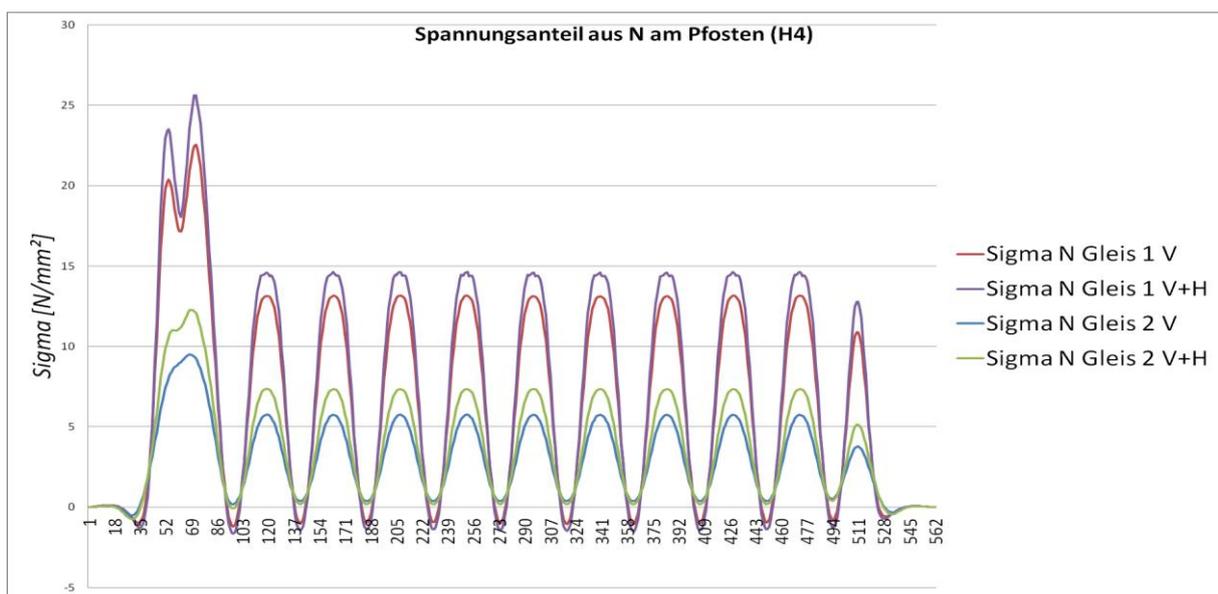


Abb. 4.16: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Pfosten H4

Auch im Pfosten H5 erkennt man ein Spannungsspiel je vier Achsen (Abb. 4.17). Der Spannungsverlauf ist dem von H4 praktisch ident, das maßgebende Gleis für die höhere Spannung ist nun jedoch Gleis 2 und die Horizontalkraft hat günstige Auswirkungen.

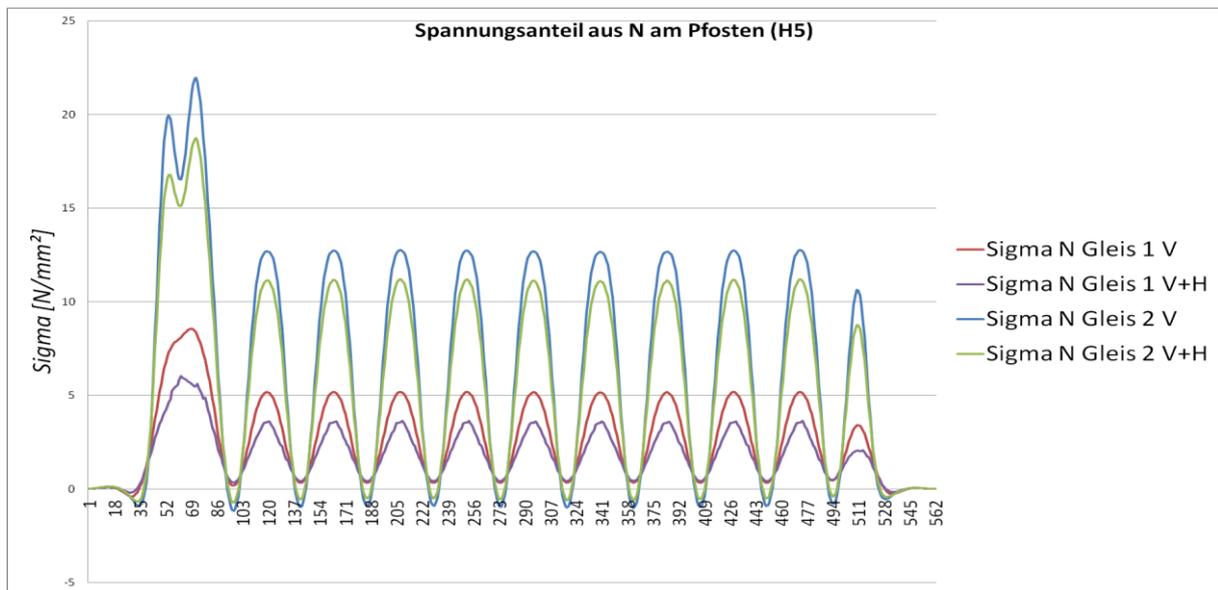


Abb. 4.17: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Pfosten H5

In der Darstellung des Spannungsverlaufs am Längsträger L_{ges} erkennt man, dass hier aufgrund der kurzen Einflusslinie jedes Drehgestell bereits ein Spannungsspiel erzeugt und - wenn auch unbedeutend für die Ermüdungsfestigkeit - auch sogar die Einzelachsen erkennbar sind (Abb. 4.18). Dieser Untersuchungspunkt besitzt die kleinste Einflusslänge, was die höchste Anzahl an Spannungsspiel hervorruft. Der Längsträgermesspunkt liegt am äußeren der beiden Längsträger von Gleis 2 (siehe Abb. 2.6), wodurch die Horizontalkraft eine sehr große Auswirkung hat. Sie erhöht jedes einzelne Spannungsspiel um etwa 100%. Wenn Gleis 1 - das nicht direkt befahrene Gleis - befahren wird treten auch geringe Spannungen zufolge der Zwängungsbeanspruchung auf, die in einer vereinfachten 2D-Berechnung vernachlässigt werden würde.

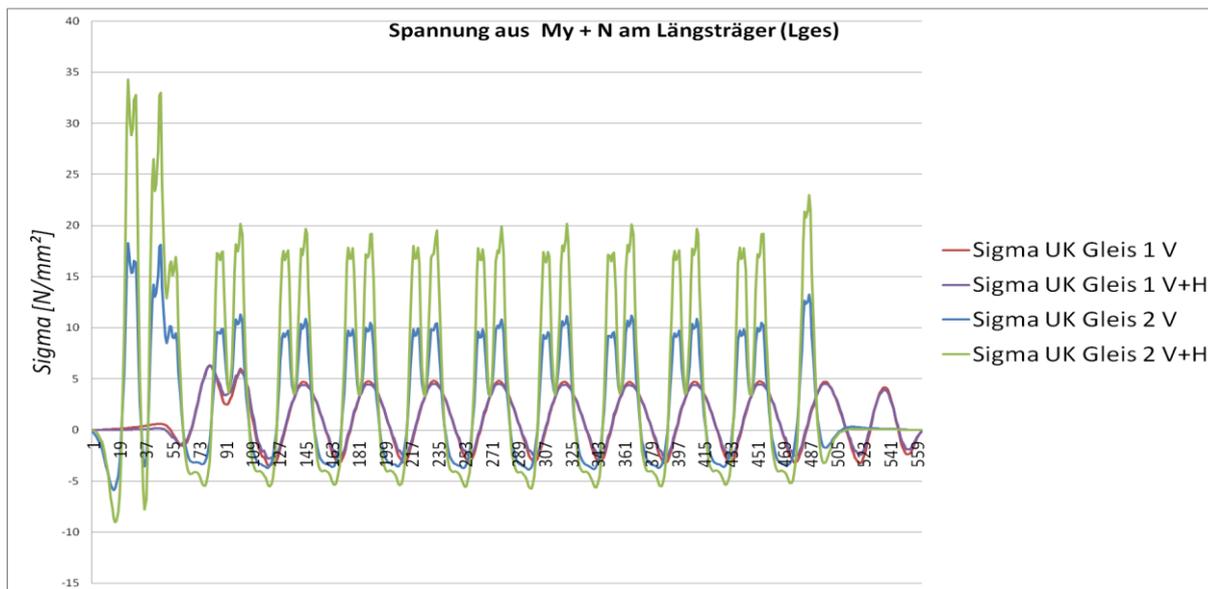


Abb. 4.18: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund Moment und Normalkraft im Längsträger L_{ges}

Am Querträger Q_{ges} zeigt sich ein ähnliches Bild, wie bei den Pfosten (Abb. 4.19). Auch hier erzeugen jeweils vier Achsen ein Spannungsspiel. Die Horizontalbelastung ist hier deshalb besonders erwähnenswert, da sie beim Befahren von Gleis 1 einen günstigen, bei Gleis 2 jedoch einen ungünstigen Einfluss hat. Dies kommt daher, dass die Horizontalkomponente des Lastenzugs bei der Überfahrt immer auf das äußere Gleis drückt. Deshalb bewirkt sie auf Gleis 1 ein negatives Moment, das dem positiven aus der vertikalen Belastung entgegenwirkt. Bei Gleis 2 tritt durch die Horizontalbelastung ein positives Moment auf, welches das aus der vertikalen Belastung verstärkt.

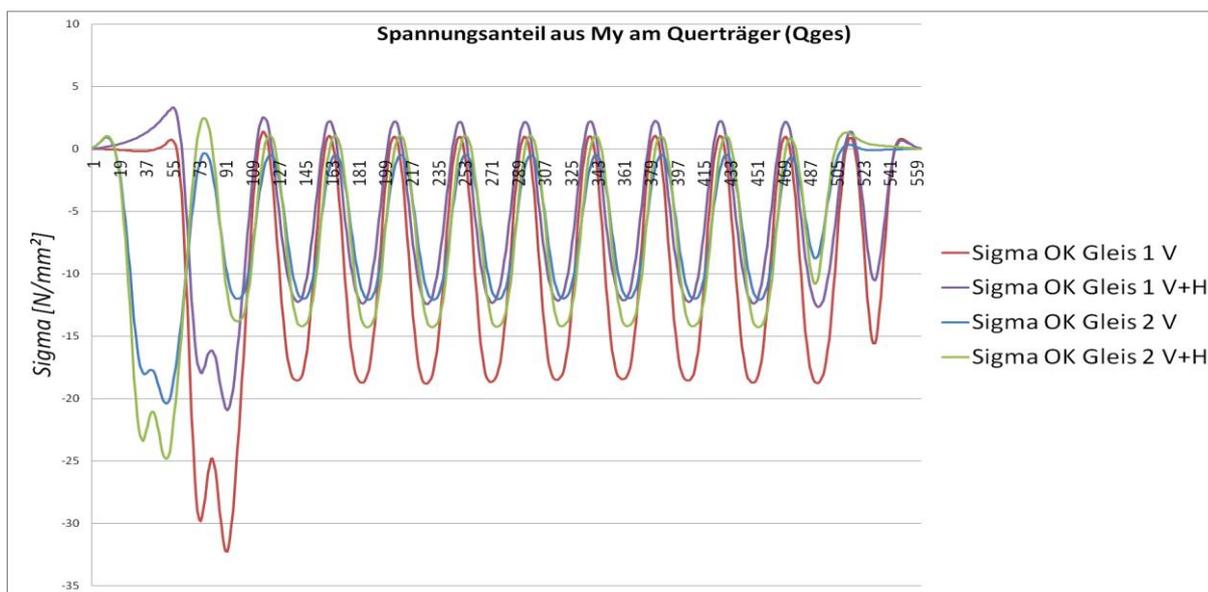


Abb. 4.19: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund Moment im Querträger Q_{ges}

Wie man in Abb. 4.20 erkennt ergeben sich in der Diagonale D1 zu Beginn der Überfahrt aufgrund der halbseitig positiven Einflusslinie sehr hohe Spannungsspitzen. Die erste tritt genau auf, wenn die Spitze des Zuges die Brückenmitte erreicht. Die zweite Spannungsspitze in die Gegenrichtung tritt aufgrund der im Vergleich zu den Waggons sehr hohen Achslasten des Triebwagens auf, wenn dieser die zweite Hälfte der Brücke erreicht. Danach entsteht wieder je ein Spannungsspiel je vier Achsen, diesmal nicht durch die direkte Überfahrt, sondern durch die Mehrheit an Achsen auf einer Hälfte der Brücke. Die Horizontalkraft hat hier nur einen sehr geringen Einfluss.

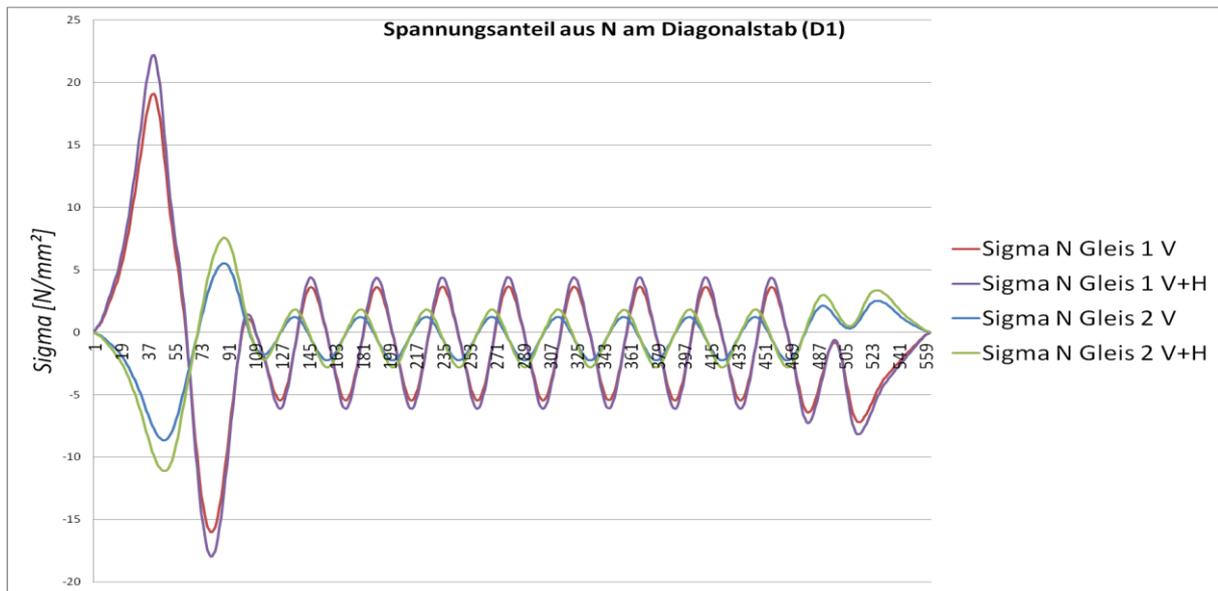


Abb. 4.20: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D1

In der Diagonale D2 - siehe Abb. 4.21- entsteht exakt derselbe, jedoch um die horizontale Achse gespiegelte Verlauf mit günstigem Einfluss der Horizontalkraft.

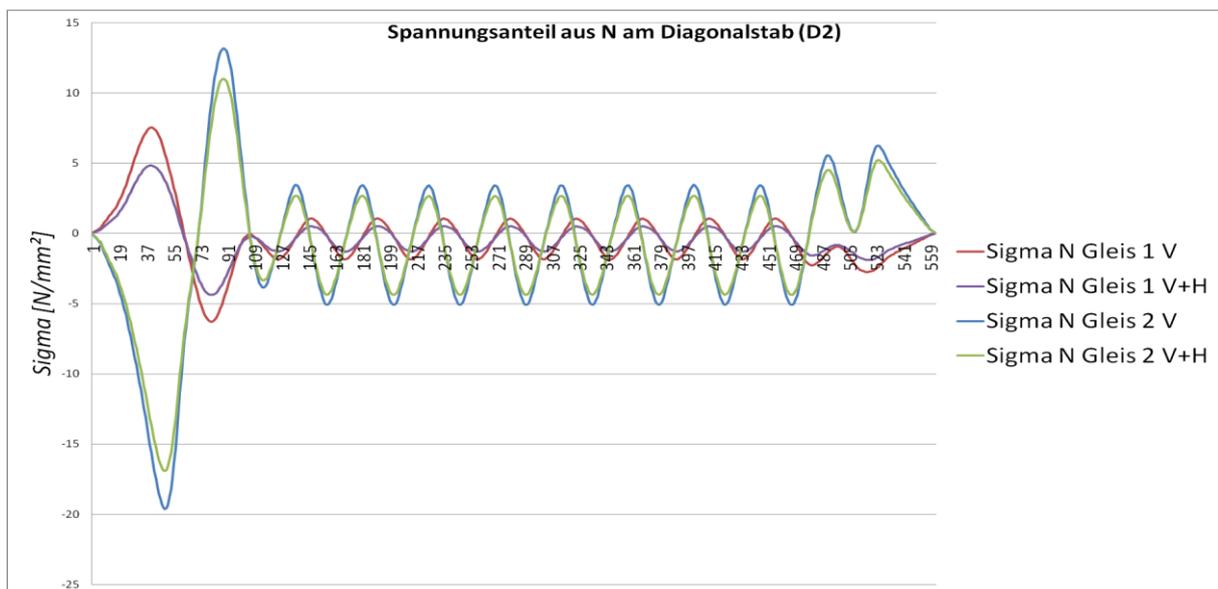


Abb. 4.21: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D2

Im Diagonalstab D3 entsteht durch die Überfahrt auf Gleis 1 zu Beginn eine geringe negative Spannung, danach entsteht eine positive Spannungsspitze der je Doppelachsenpaar ein kleines Spannungsspiel folgt (Abb. 4.22). Hier hat die Horizontalkraft eine geringe steigernde Wirkung.

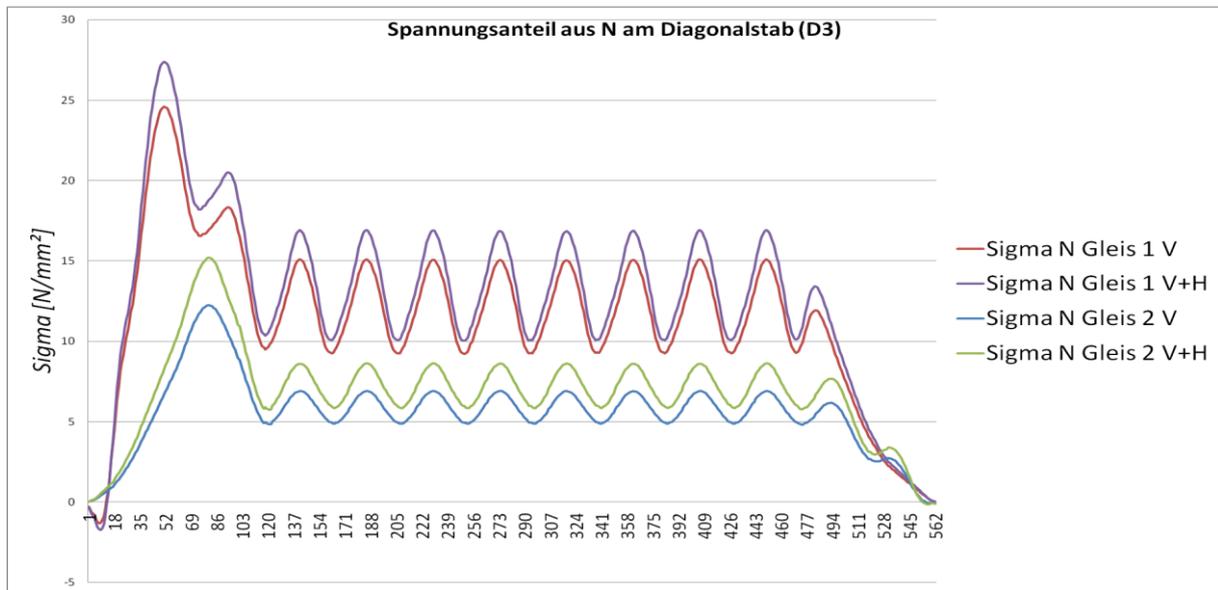


Abb. 4.22: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D3

In der Diagonale D4 entsteht durch die Überfahrt des Lastenzuges ein dem von D3 sehr ähnliches Bild (Abb. 4.23). Diesmal entsteht durch die hintere Doppelachse des Triebwagens jedoch kein zusätzliches Spannungsspiel und die geringe negative Spannung entsteht am Ende der Überfahrt. Die Horizontalkraft hat wiederum keinen großen Einfluss, diesmal hat er jedoch wieder günstige Auswirkungen.

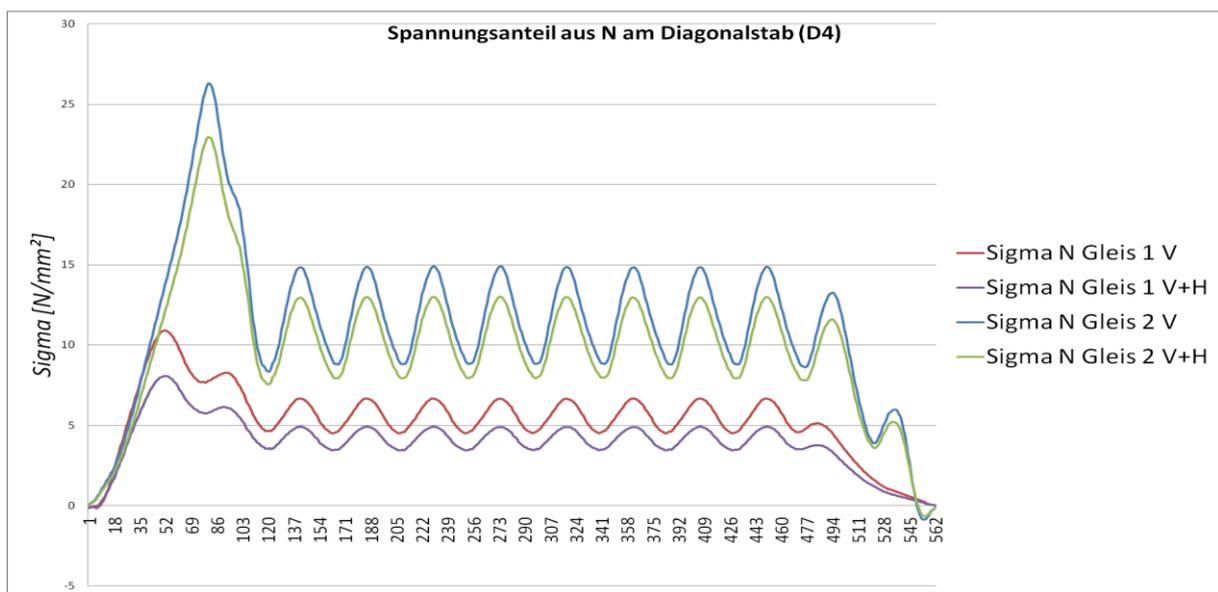


Abb. 4.23: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D4

4.2.2 Lastenzug Typ 3

Der Aufbau des Lastenzugs des Typs drei entspricht einem Hochgeschwindigkeitsreisezug mit jeweils einem Triebwagen am vorderen und am hinteren Ende (Abb. 4.24). Mit seiner Überfahrtsgeschwindigkeit von 250 km/h ist er der schnellste in der Norm festgelegte Lastenzug und hat somit die größten horizontalen Auswirkungen.

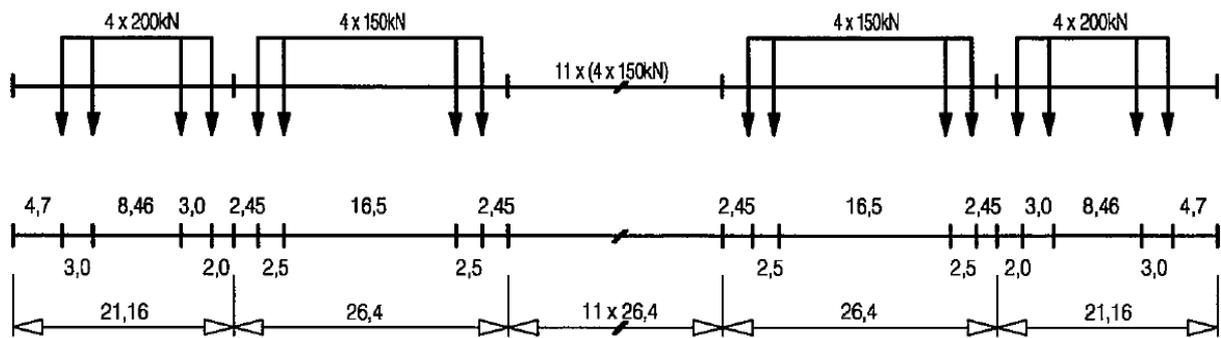


Abb. 4.24: Typ 3, Hochgeschwindigkeitsreisezug ^[2]

In den folgenden Bildern (Abb. 4.25 bis Abb. 4.36) wird der Spannungsverlauf in den jeweiligen Querschnitten, hervorgerufen durch die Überfahrt des Lastenzugs des Typs 3, dargestellt. Bei den Fachwerkstäben wurde die Spannung nur aufgrund der Normalkraft im Querschnitt berechnet, im Längsträger und im Querträger wurde auch bzw. nur das Moment berücksichtigt. Die horizontale Achse des Diagramms bezeichnet den Lastfall, aus dem die Spannung resultiert. Da alle 0,6 m ein Lastfall erstellt wurde, muss man die Lastfälle mit 0,6 multiplizieren um den aktuellen Abstand der Zugspitze zum Startpunkt auf der Brücke in Metern zu erhalten. Da die Überfahrt abhängig vom Gleis von verschiedenen Seiten der Brücke startet, kommt es bei einigen Punkten zu horizontalen Verschiebungen der Spannungsspitzen.

In Abb. 4.25 ist der Spannungsverlauf im Untergurt U1/U2 zu sehen. Die Ausschläge zu Beginn und am Ende der Überfahrt resultieren aus den Achslasten des Triebwagens, das Spannungsniveau dazwischen resultiert aus der Überfahrt der leichteren Waggonen. Durch die Triebwagen werden bei der Überfahrt ein großes und ein kleineres Spannungsspiel hervorgerufen. Aufgrund der großen Einflusslänge in diesem Punkt haben die einzelnen Achsen keinen großen Einfluss auf die Ermüdungslast. U1/U2 liegt auf der Bogenaußenseite, weshalb die Horizontalkraft die Spannung stark erhöht. Aufgrund der hohen Geschwindigkeit des Lastenzuges steigt die Spannung durch den Einfluss der Horizontalkräfte bei der Überfahrt auf Gleis 1 um genau 100%. Bei der Überfahrt auf Gleis 2 steigert sich die Spannung sogar um beinahe 200%.

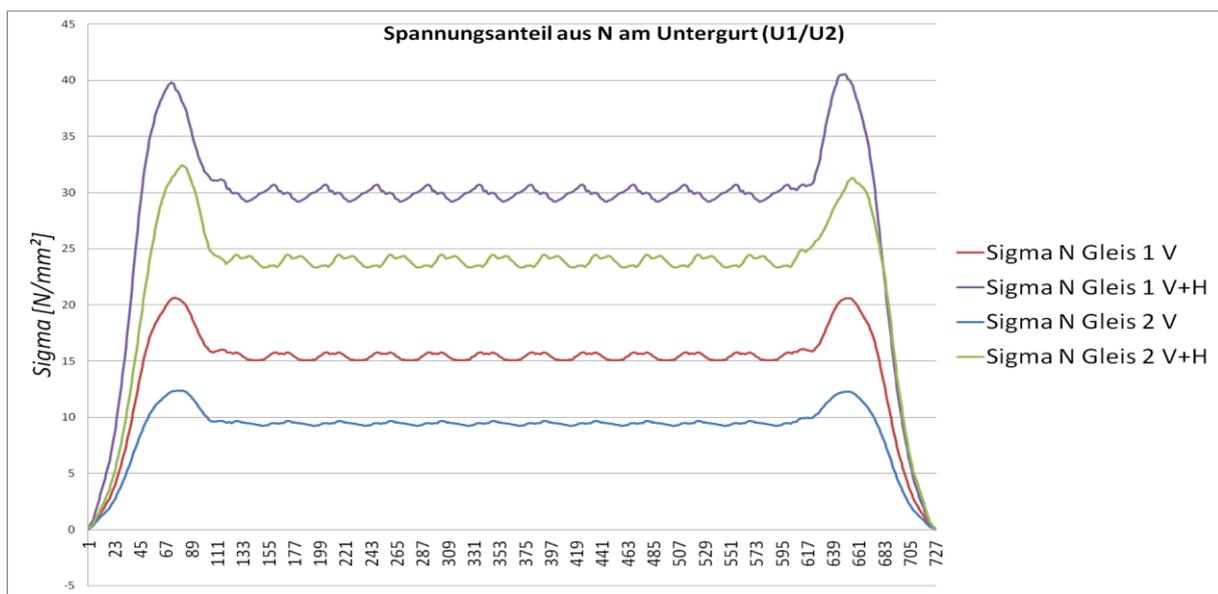


Abb. 4.25: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund der Normalkraft im Untergurt U1/U2

Im Untergurt U3 ist der Spannungsverlauf, hervorgerufen durch die Vertikallasten, exakt der gleiche, mit dem einzigen Unterschied, dass der Einfluss der Gleise vertauscht ist (Abb. 4.26). Dadurch, dass der Punkt diesmal auf der Bogeninnenseite liegt, verringert der Einfluss der Horizontalkraft die Spannungen. Bei der Überfahrt auf Gleis 2 verringert sich die Spannung soweit, dass sie verschwindet, auf Gleis 1 ändert sich das Vorzeichen der Spannungen, sodass durch die Zugüberfahrt sogar Druckspannungen auftreten. Wird also in diesem Punkt die Horizontalbelastung berücksichtigt, erweist sich plötzlich Gleis 1, also das dem Punkt abgewandte Gleis, als das Maßgebende.

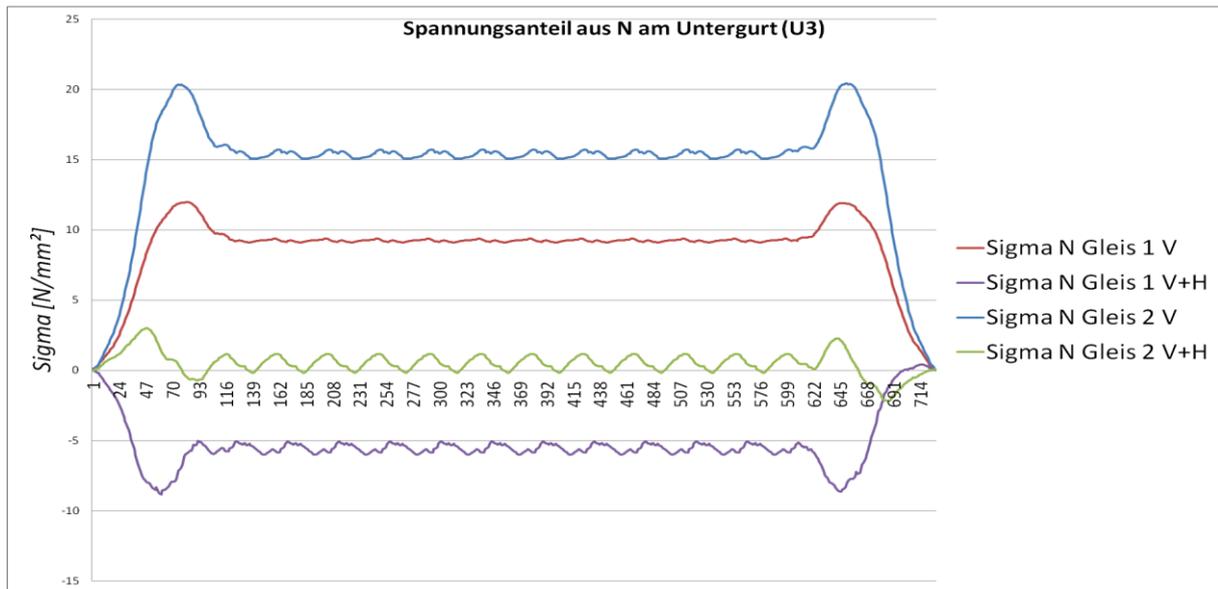


Abb. 4.26: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund der Normalkraft im Untergurt U3

Am Spannungsbild des Untergurts U6 ist zu erkennen, dass die Achslasten des Triebwagens nicht viel höher sind, als die der Waggonen (Abb. 4.27). Deshalb sind die Spannungsspitzen am Anfang und am Ende der Überfahrt nicht so stark ausgeprägt wie etwa noch beim Lastenzug Typ 2. Aufgrund der großen Einflusslänge kann wieder nur ein großes Spannungsspiel entstehen, jedoch entstehen dazwischen viele kleinere, die mit etwa 30% davon auftreten. Berücksichtigt man auch die Horizontalbelastung, wird die Spannung im Untergurt wieder enorm erhöht.

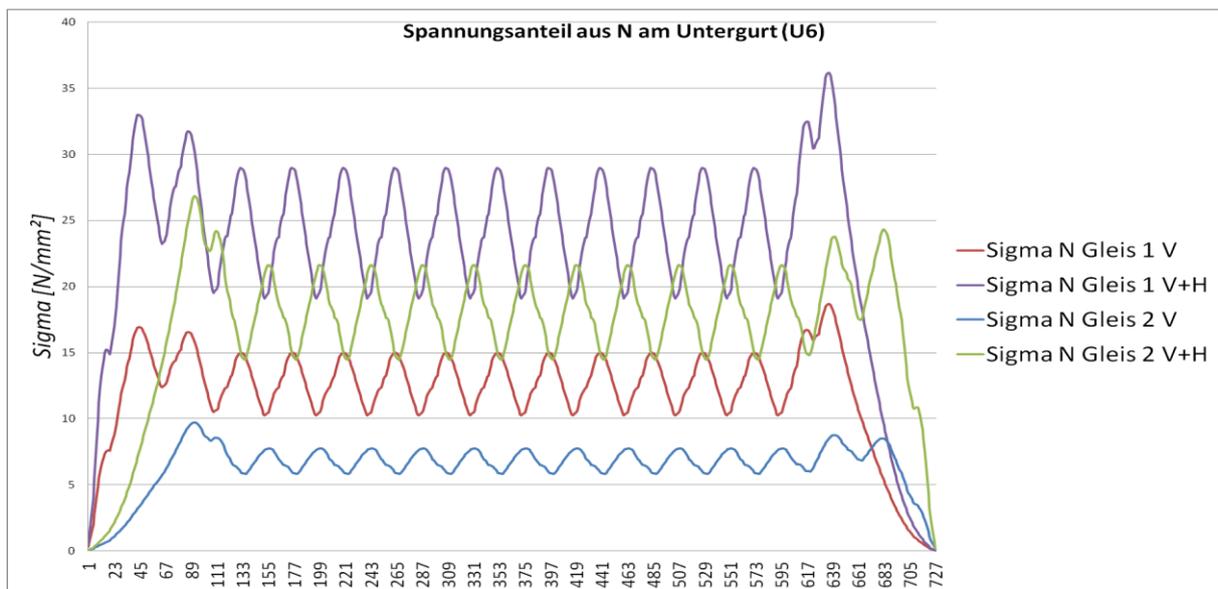


Abb. 4.27: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund der Normalkraft im Untergurt U6

In Abb. 4.28 erkennt man den gleichen Spannungsverlauf durch die Vertikallasten am Untergurt U7 wie bei U6 davor, nur horizontal gespiegelt. Hier wirkt die Horizontalbelastung jedoch wieder günstig, sodass die Spannung von Gleis 2 verschwindet und jene von Gleis 1 umkehrt. Somit wird mit Berücksichtigung der Horizontallast wieder Gleis 1 das Maßgebende.

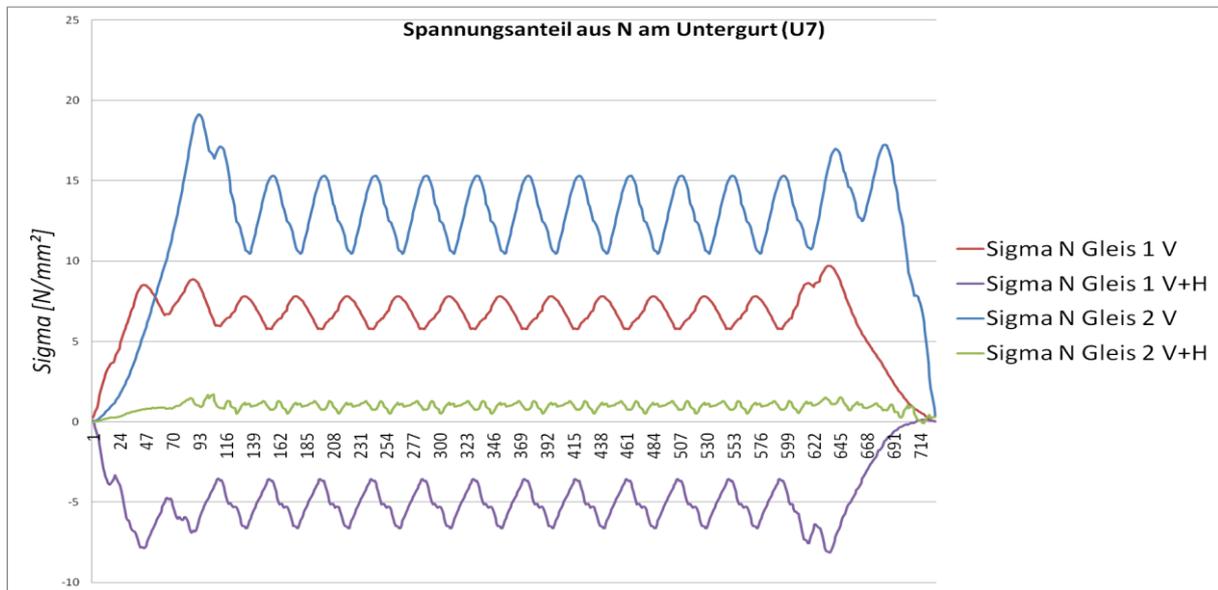


Abb. 4.28: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft am Untergurt U7

Am Pfosten H4 sieht man bereits wieder am Spannungsverlauf die geringe Einflusslänge. Das vordere Drehgestell des Triebwagens und danach je vier Achsen des Zuges -die beiden hinteren des einen Waggons zusammen mit den beiden vorderen des nächsten - haben eine Spannungsspitze zur Folge, dazwischen geht die Spannung immer auf null zurück oder liegt sogar darunter (Abb. 4.29). Auch der Einfluss der Horizontalkraft hat sich zusammen mit der Einflusslänge stark verringert, jedoch erhöht sie die Spannung weiterhin sehr stark.

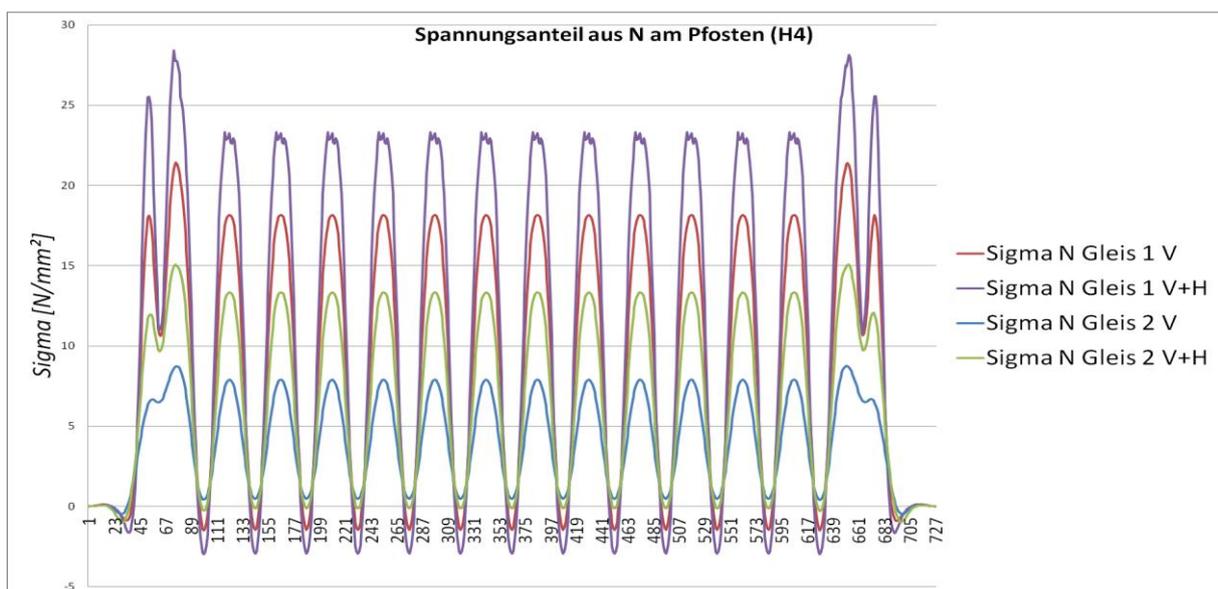


Abb. 4.29: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Pfosten H4

Auch im Pfosten H5 erkennt man ein Spannungsspiel je vier Achsen (Abb. 4.30). Der Spannungsverlauf ist dem von H4 praktisch ident, nur die Gleise sind vertauscht und die Horizontalkraft hat günstige Auswirkungen.

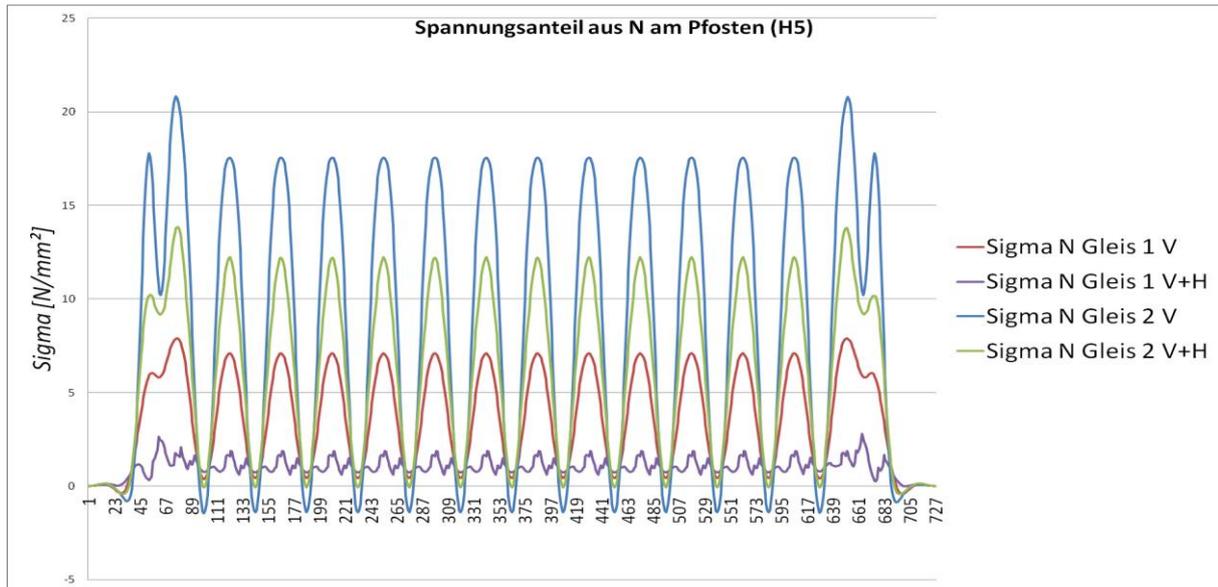


Abb. 4.30: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Pfosten H5

In der Darstellung des Spannungsverlaufs am Längsträger L_{ges} erkennt man, dass jedes Drehgestell ein Spannungsspiel erzeugt (Abb. 4.31). Dieser Untersuchungspunkt besitzt die kleinste Einflusslänge, was die höchste Anzahl an Spannungsspielen hervorruft. Der Längsträgermesspunkt liegt am äußeren der beiden Längsträger von Gleis 2, wodurch die Horizontalkraft enorme Auswirkungen hat. Sie erhöht jedes einzelne Spannungsspiel um etwa 200%. Wenn jedoch Gleis 1 befahren wird treten im Vergleich nur sehr geringe Spannungen auf.

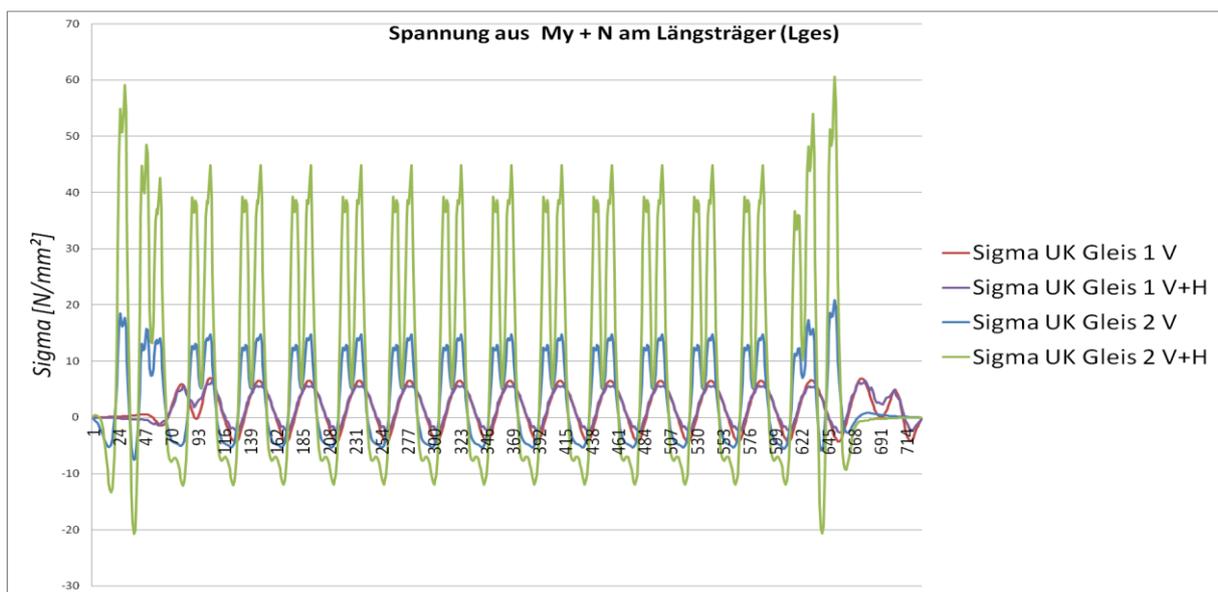


Abb. 4.31: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund Moment und Normalkraft im Längsträger L_{ges}

Am Querträger Q_{ges} zeigt sich ein ähnliches Bild, wie bei den Pfosten (Abb. 4.32). Auch hier erzeugen jeweils vier Achsen ein Spannungsspiel. Wie schon beim Lastenzug Typ 2 beschrieben hat die Horizontallast auch hier abhängig vom befahrenen Gleis unterschiedlichen Einfluss.

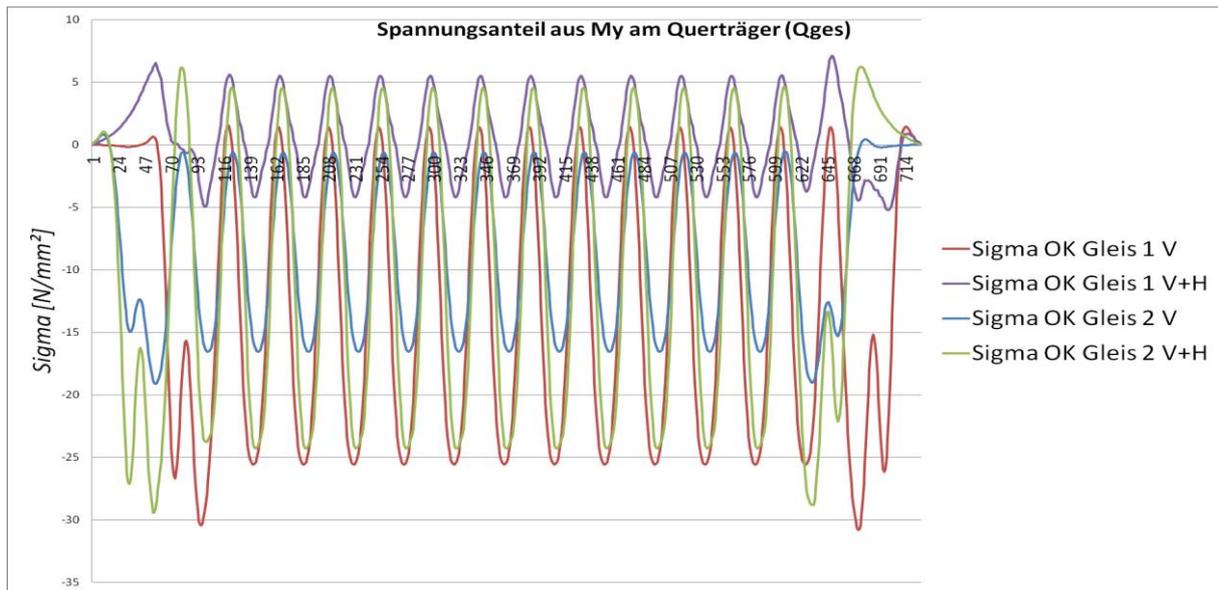


Abb. 4.32: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund Moment im Querträger Q_{ges}

Aufgrund der halbseitig positiven Einflusslinie ergeben sich in der Diagonale D1 zu Beginn und am Ende der Überfahrt sehr hohe Spannungsspitzen (Abb. 4.33). Die erste tritt genau auf, wenn die Spitze des Zuges die Brückenmitte erreicht. Die zweite Spannungsspitze in die Gegenrichtung ist nicht mehr so stark ausgeprägt wie beim vorherigen Lastenzug, da die Achslasten des Triebwagens nicht mehr so viel höher als die der Waggons sind. Jedoch entstehen aufgrund des zweiten Triebwagens am Ende des Zuges ebenfalls zwei Spannungsspitzen, die letzte genau wenn das Ende des Zuges die Brückenmitte erreicht. Dazwischen entsteht wieder je ein Spannungsspiel je vier Achsen, diesmal nicht durch die direkte Überfahrt, sondern durch die Mehrheit an Achsen auf einer Hälfte der Brücke. An diesem Punkt hat die Horizontalkraft einen geringeren Einfluss als in den anderen Untersuchungspunkten der Brücke.

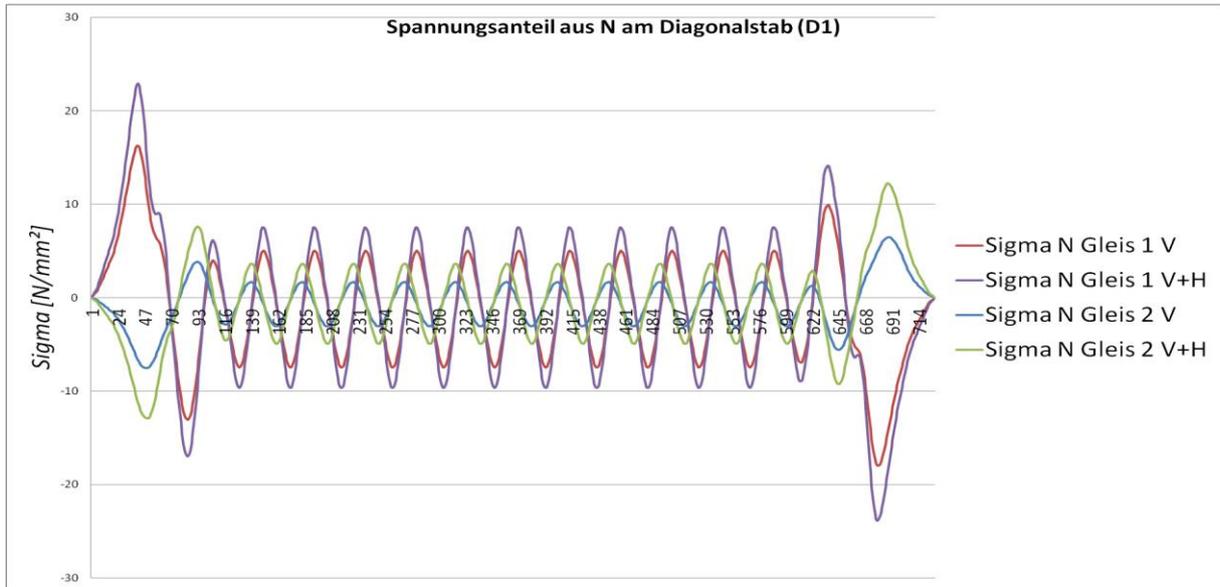


Abb. 4.33: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D1

In der Diagonale D2 entsteht exakt derselbe, jedoch um die horizontale Achse gespiegelte Verlauf mit günstigem Einfluss der Horizontalkraft (Abb. 4.34).

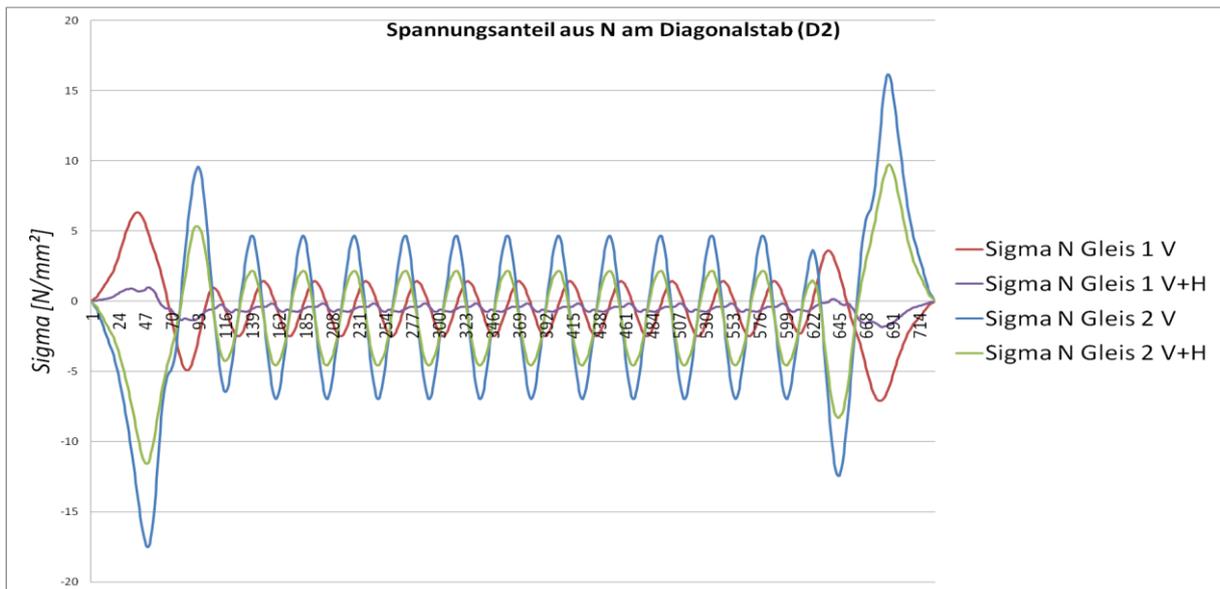


Abb. 4.34: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D2

Im Diagonalstab D3 entsteht durch die Überfahrt auf Gleis 1 zu Beginn eine geringe negative Spannung, danach ähnelt der Spannungsverlauf stark dem der Untergurte U6 und U7, was aufgrund der Ähnlichkeiten der Einflusslinie auch plausibel ist (Abb. 4.35). Hier hat die Horizontalkraft eine wieder etwas größere steigernde Auswirkung.

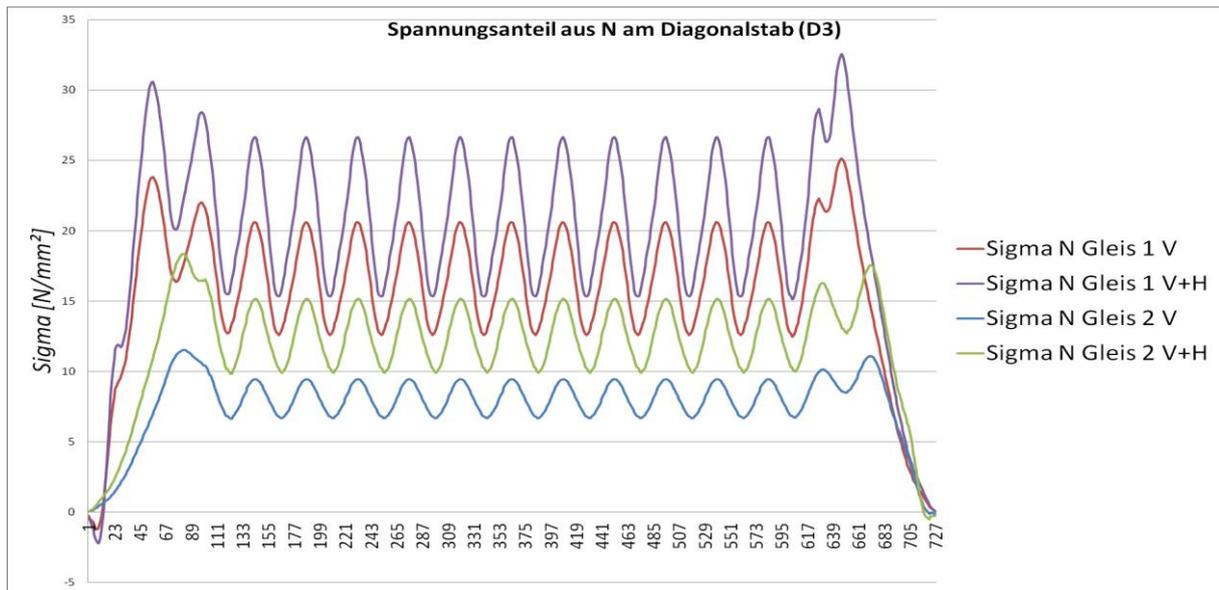


Abb. 4.35: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D3

In der Diagonale D4 entsteht durch die Überfahrt des Lastenzuges ein dem von D3 sehr ähnliches Bild (Abb. 4.36). Die geringe negative Spannung entsteht diesmal am Ende der Überfahrt. Die Horizontalkraft hat diesmal wieder günstige Auswirkungen.

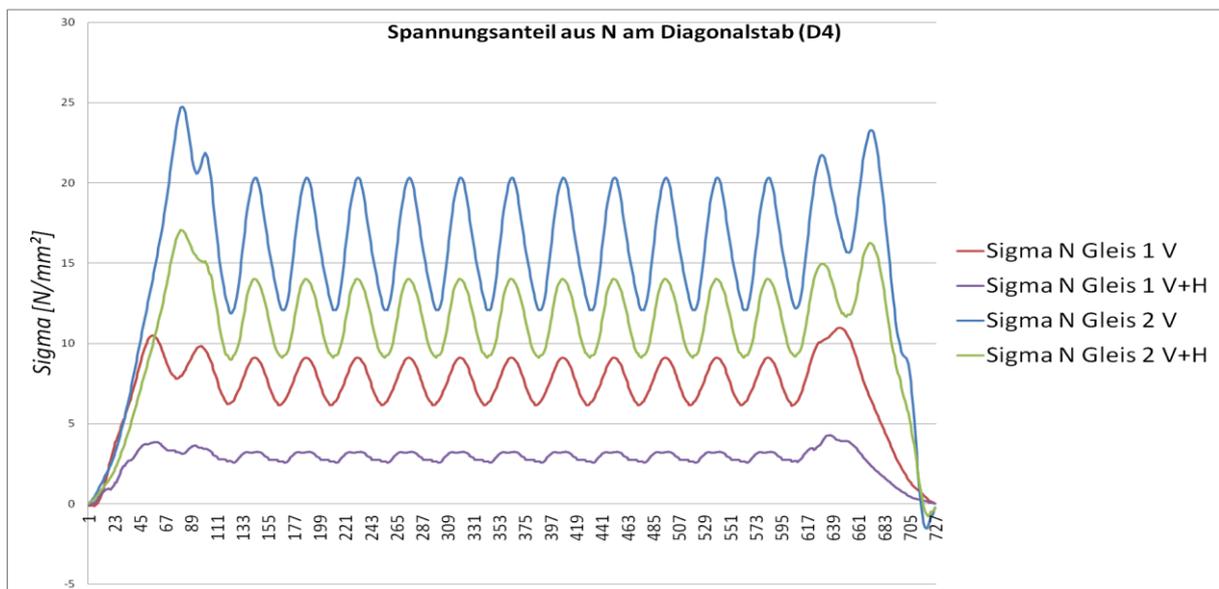


Abb. 4.36: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D4

4.2.3 Lastenzug Typ 5

Der Aufbau des Lastenzugs des Typs fünf entspricht einem lokgezogenen Güterzug. Er stellt den Lastenzug mit den höchsten Achslasten und meisten Achsen dar (Abb. 4.37). Seine Länge und seine Überfahrtsgeschwindigkeit betragen 270,3 m sowie 80 km/h. Aufgrund seiner niedrigen Fahrgeschwindigkeit sind keine hohen Horizontalauswirkungen zu erwarten, jedoch treten durch die hohen Achslasten in einigen Bauteilen sehr viele und hohe Spannungsspiele auf.

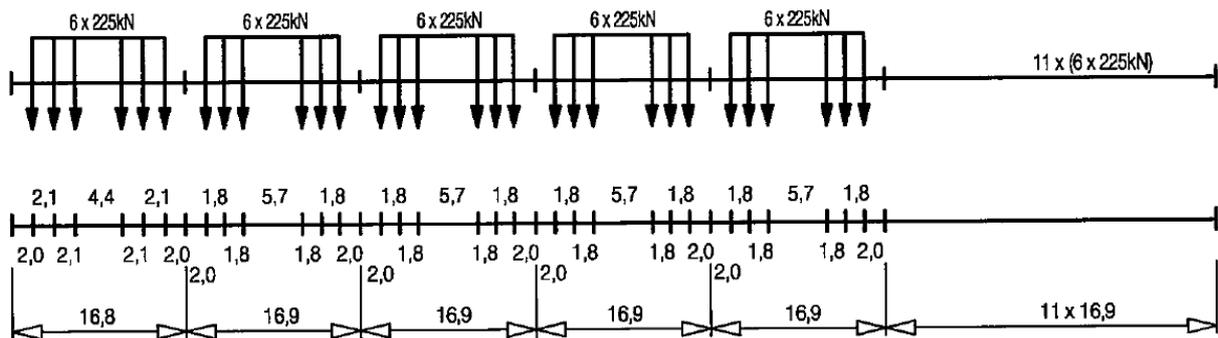


Abb. 4.37: Typ 5, Lokgezogener Güterzug ^[2]

In den folgenden Bildern wird der Spannungsverlauf in den jeweiligen Querschnitten, hervorgerufen durch die Überfahrt des Lastenzugs des Typs 5, dargestellt. Bei den Fachwerkstäben wurde die Spannung nur aufgrund der Normalkraft im Querschnitt berechnet, im Längsträger und im Querträger wurde auch bzw. nur das Moment berücksichtigt. Die horizontale Achse des Diagramms bezeichnet den Lastfall, aus dem die Spannung resultiert. Da alle 0,6 m ein Lastfall erstellt wurde, muss man die Lastfälle mit 0,6 multiplizieren um den aktuellen Abstand der Zugspitze zum Startpunkt auf der Brücke in Metern zu erhalten. Da die Überfahrt abhängig vom Gleis von verschiedenen Seiten der Brücke startet, kommt es bei einigen Punkten zu horizontalen Verschiebungen der Spannungsspitzen.

In Abb. 4.38 ist der Spannungsverlauf im Untergurt U1/U2 zu sehen. Da die Achslasten des Triebwagens dieselben wie die der Waggons sind, entstehen keine eigenen Spannungsspitzen, jedoch ist das entstehende Spannungsniveau sehr hoch, da auch die Achslasten sehr groß sind. Dieses entsteht aufgrund der großen Einflusslänge und den gleichmäßigen Achslasten, es bleibt über die gesamte Länge des Zuges beinahe gleich und schwankt nur sehr wenig. Die Horizontalkräfte sind aufgrund der niedrigen Fahrgeschwindigkeit ebenfalls sehr niedrig und steigern die Spannung um weniger als 10%.

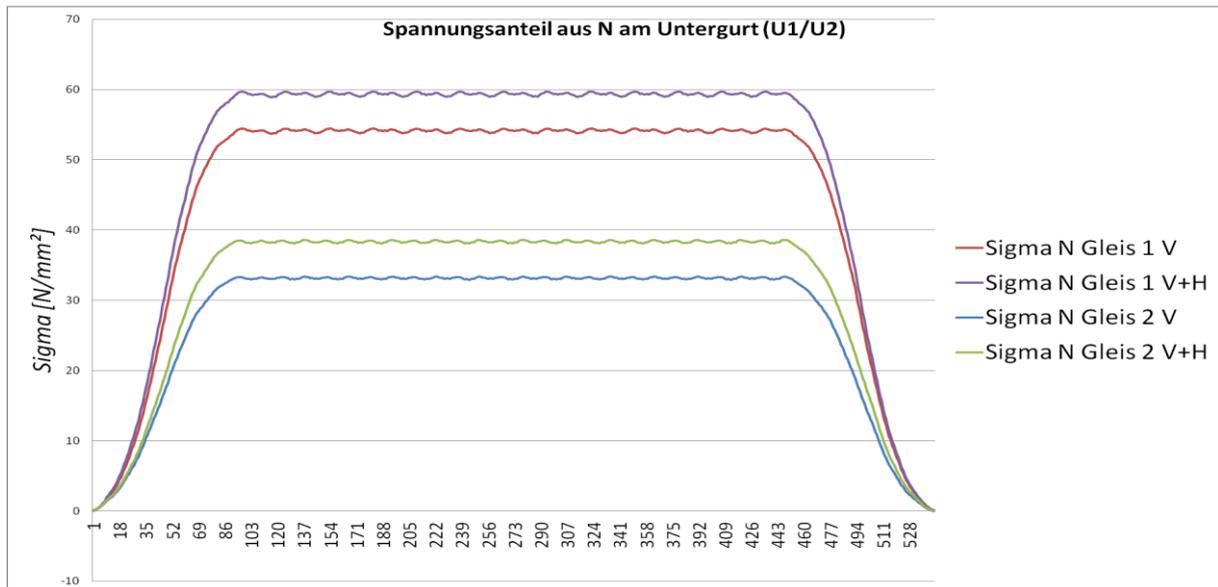


Abb. 4.38: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund der Normalkraft im Untergurt U1/U2

Im Untergurt U3 ist der Spannungsverlauf, hervorgerufen durch die Vertikallasten, exakt der gleiche, mit dem einzigen Unterschied, dass der Einfluss der Gleise vertauscht ist (Abb. 4.39). Der verringernde Einfluss der Horizontalkräfte ist auch hier nur sehr gering.

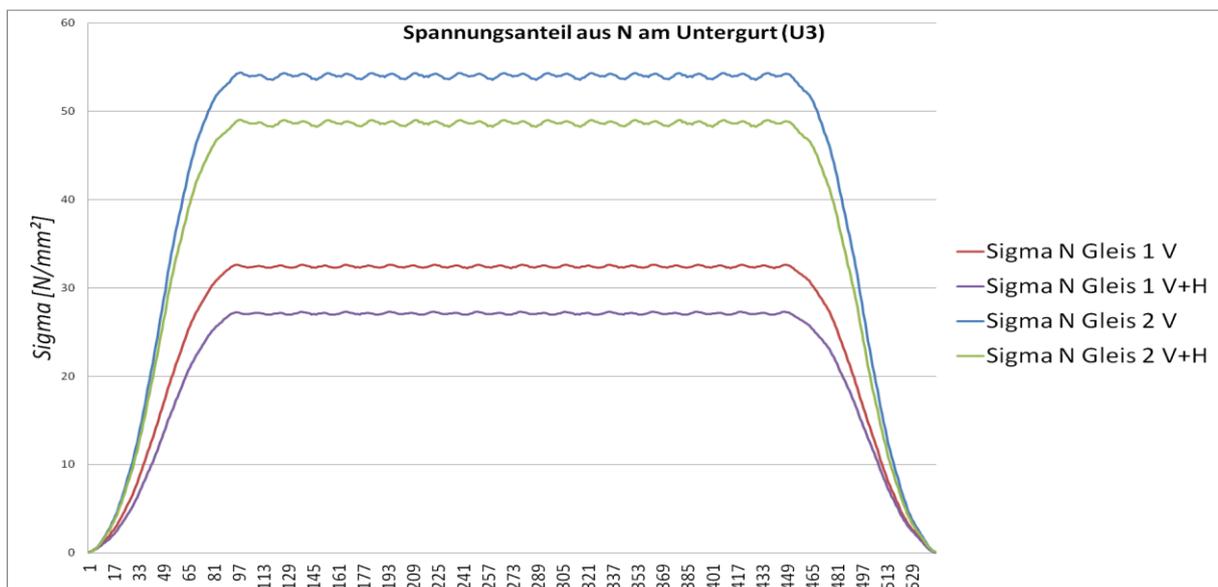


Abb. 4.39: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund der Normalkraft im Untergurt U3

Am Spannungsbild des Untergurts U6 ist zu erkennen, dass auch hier durch die große Einflusslänge nur ein gleichmäßiges Spannungsniveau entsteht (Abb. 4.40). Man sieht zwar die Schwankungen aufgrund der einzelnen Achsen, jedoch liegt diese in einem nicht erwähnenswerten Bereich. Berücksichtigt man auch die Horizontalbelastung, wird die Spannung im Untergurt wieder etwas erhöht.

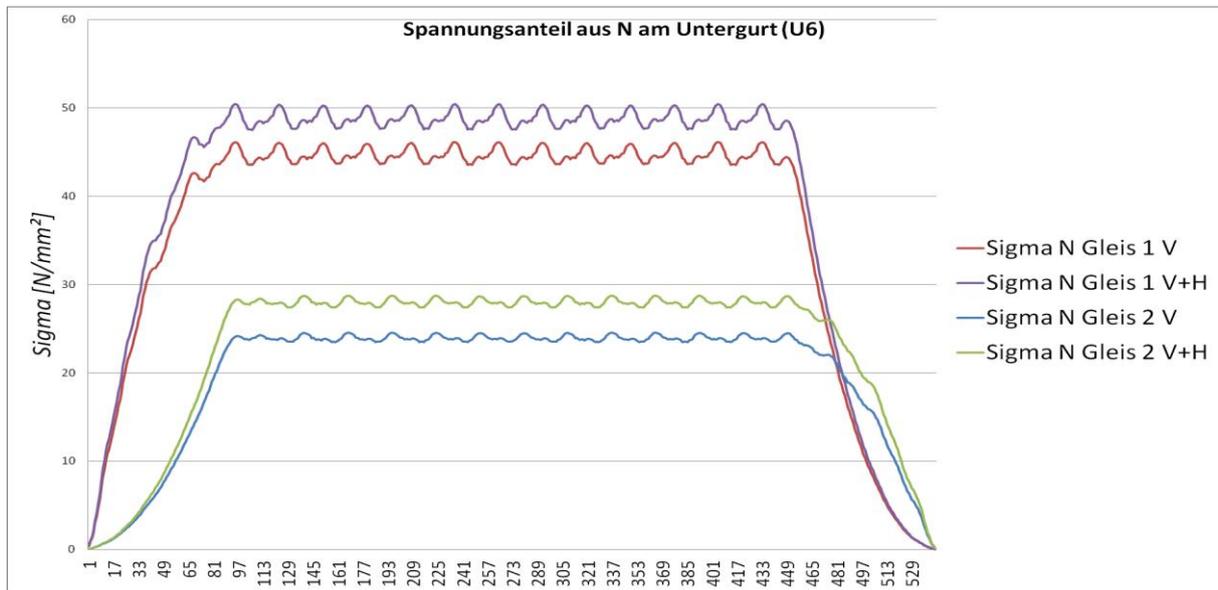


Abb. 4.40: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund der Normalkraft im Untergurt U6

Am Spannungsverlauf durch die Vertikallasten am Untergurt U7 erkennt man das gleiche Bild wie bei U6 davor, nur horizontal gespiegelt (Abb. 4.41). Hier wirkt die Horizontalbelastung jedoch wieder günstig, sodass sich die Spannung geringfügig verkleinert.

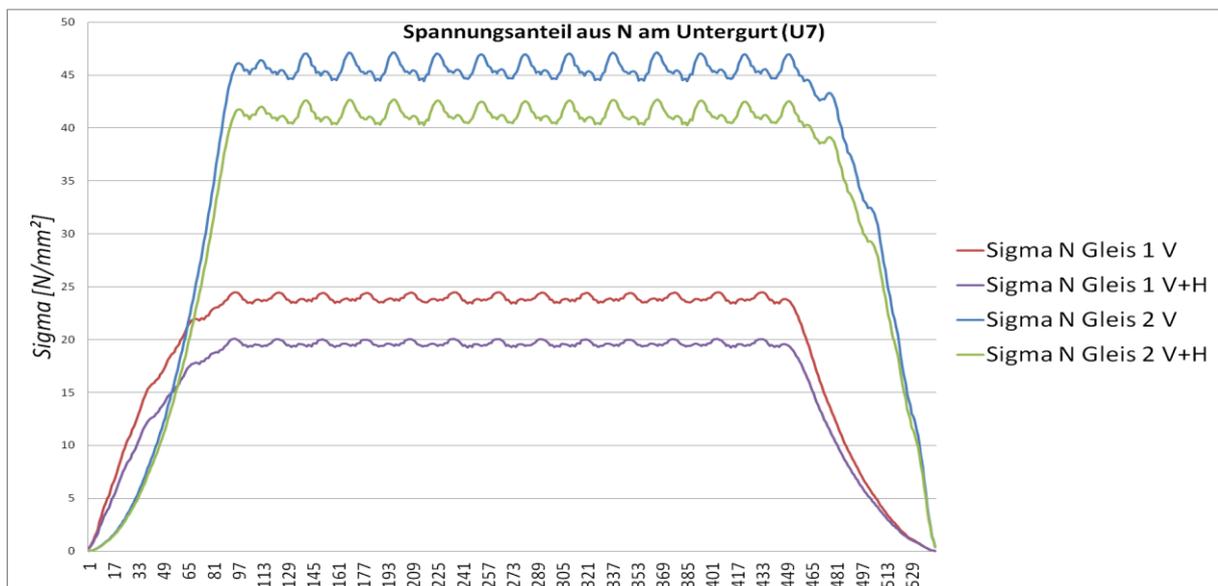


Abb. 4.41: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft am Untergurt U7

Beim Pfosten H4 sieht man bereits wieder am Spannungsverlauf die geringe Einflusslänge (Abb. 4.42). Hier entsteht je sechs Achsen des Zuges -die drei hinteren des einen Waggons zusammen mit den drei vorderen des nächsten - ein Spannungsspiel zur Folge. Aufgrund der hohen Gesamtlast des Zuges geht die Spannung jedoch nicht mehr auf null zurück. Die Horizontalkräfte sind hier so gering, dass sie die Spannung praktisch nicht erhöhen.

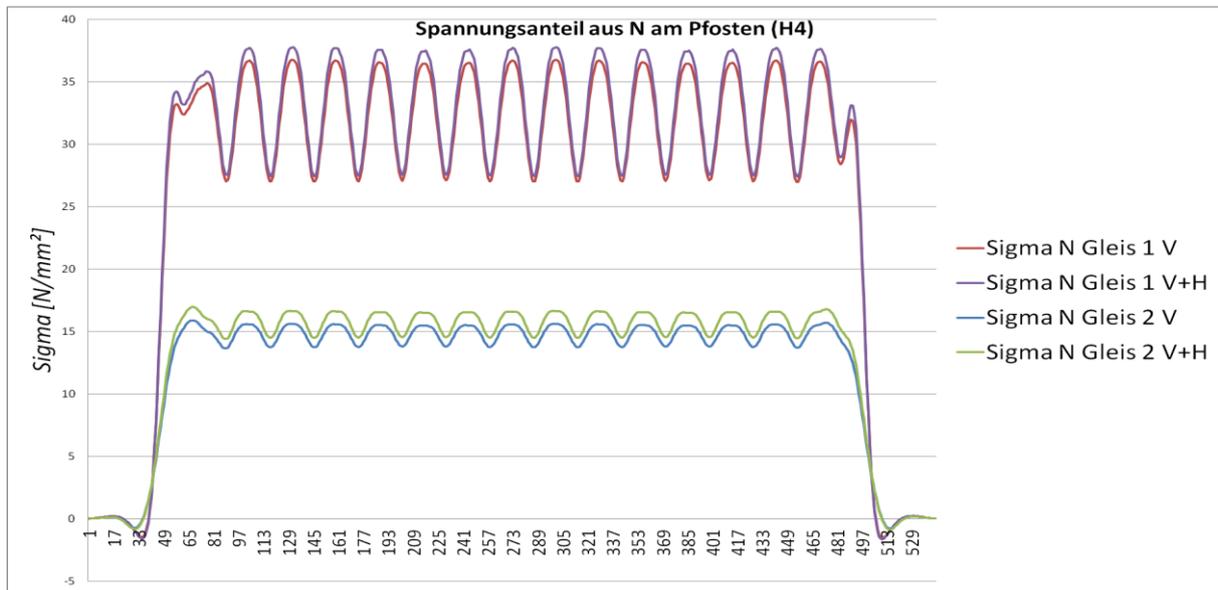


Abb. 4.42: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Pfosten H4

Auch im Pfosten H5 erkennt man ein Spannungsspiel je sechs Achsen (Abb. 4.43). Der Spannungsverlauf ist dem von H4 praktisch ident, nur die Gleise sind vertauscht.

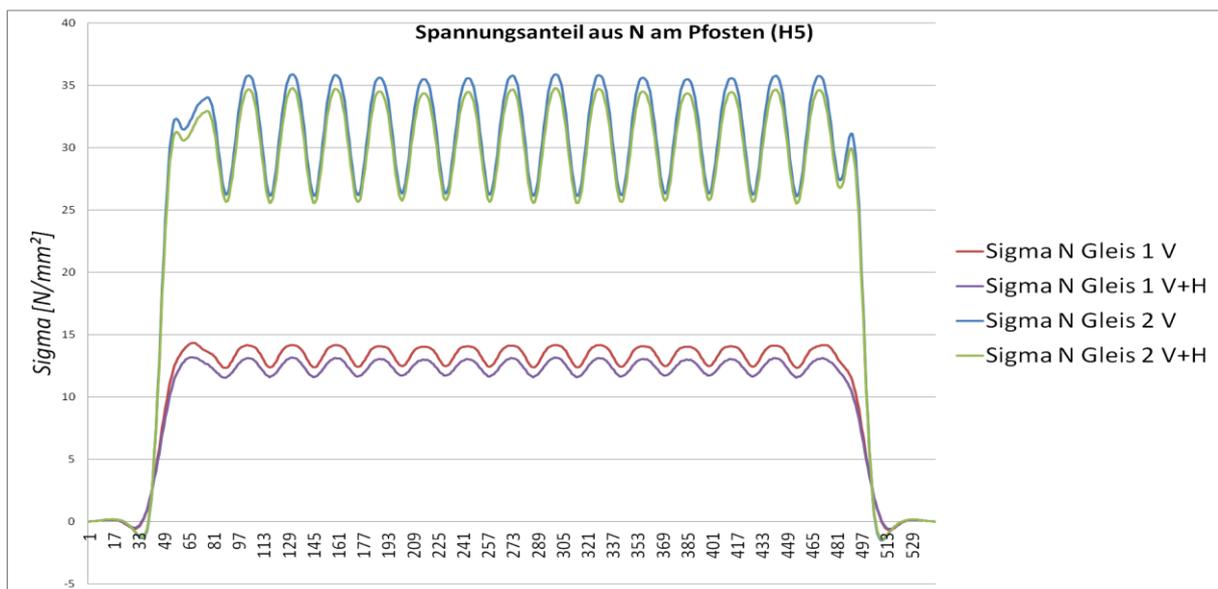


Abb. 4.43: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Pfosten H5

In der Darstellung des Spannungsverlaufs am Längsträger L_{ges} erkennt man, dass je sechs Achsen ein Spannungsspiel erzeugen (Abb. 4.44). Durch je drei Achsen eines Waggons entsteht dazwischen noch ein etwas kleineres Spannungsspiel. Dieser Untersuchungspunkt besitzt die kleinste Einflusslänge, was sich durch die höchste Anzahl an Spannungsspiel zeigt. Obwohl sich gezeigt hat, dass dieser Punkt am anfälligsten für die Horizontalbeanspruchung ist, erzeugt dieser Lastenzug keine große Erhöhung der Spannung, was die niedrige Horizontallast nochmals bestätigt.

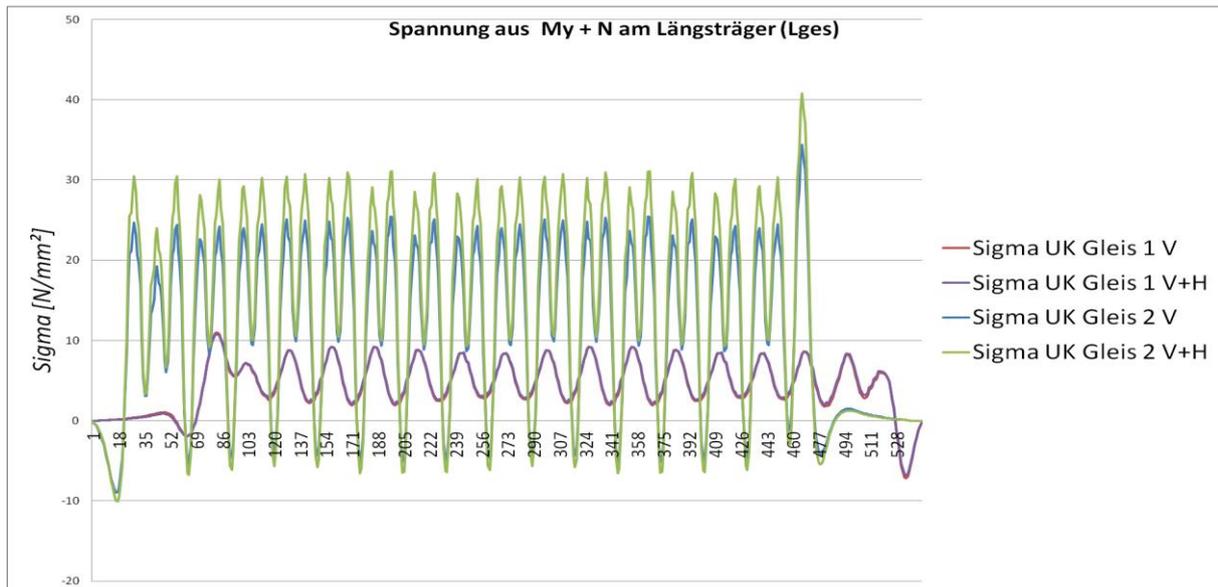


Abb. 4.44: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund Moment und Normalkraft im Längsträger L_{ges}

Am Querträger Q_{ges} zeigt sich ein ähnliches Bild, wie bei den Pfosten (Abb. 4.45). Auch hier erzeugen jeweils sechs Achsen ein Spannungsspiel. Die Horizontallast hat auch hier nur sehr geringen Einfluss.

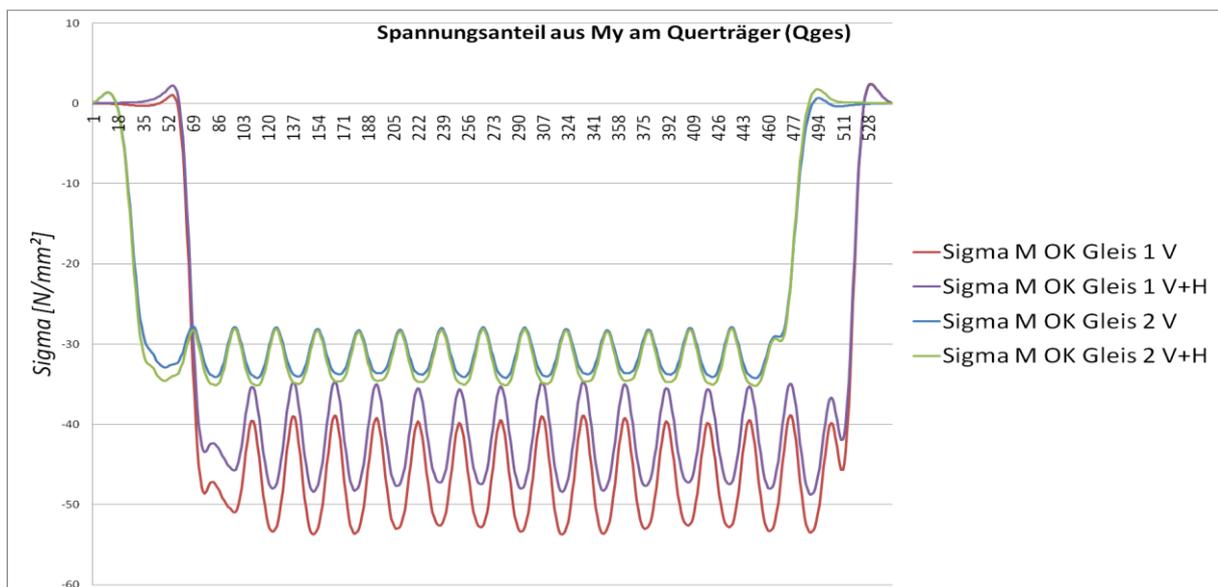


Abb. 4.45: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund Moment im Querträger Q_{ges}

Aufgrund der halbseitig positiven Einflusslinie ergeben sich in der Diagonale D1 zu Beginn und am Ende der Überfahrt sehr hohe Spannungsspitzen (Abb. 4.46). Die erste tritt genau auf, wenn die Spitze des Zuges die Brückenmitte erreicht. Die zweite Spannungsspitze in die Gegenrichtung am Ende der Überfahrt entsteht genau wenn das Zugende die Brückenmitte erreicht. Dazwischen egalisieren sich die Belastungen auf den beiden Brückenhälften, sodass die Spannung nahe der Nulllinie ein wenig schwankt. Die Horizontalkraft hat hier keinen Einfluss.

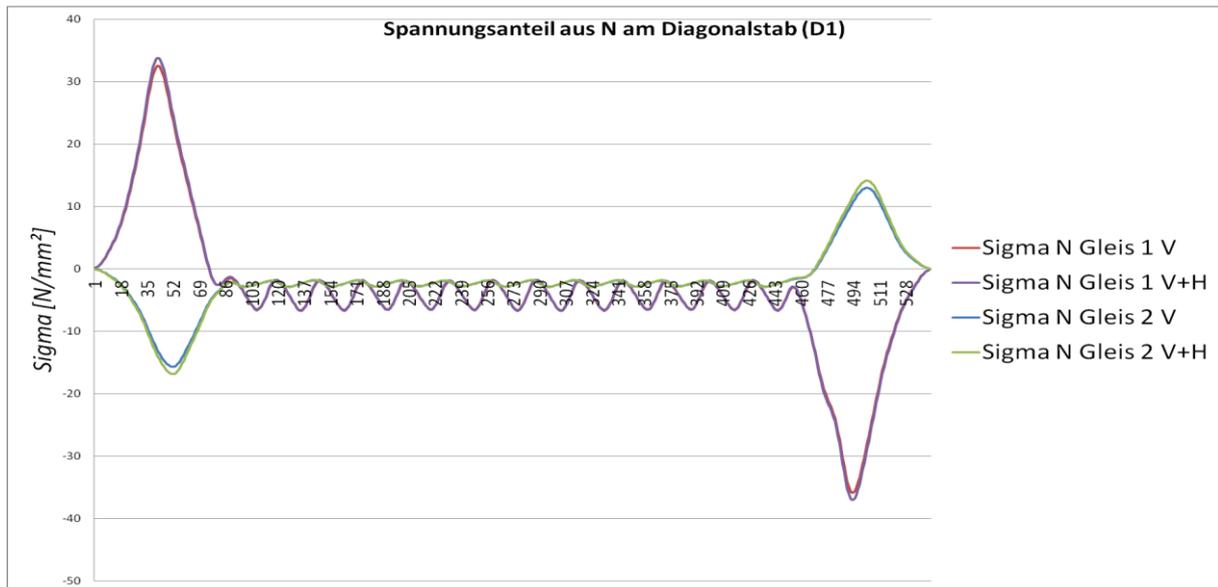


Abb. 4.46: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D1

In der Diagonale D2 entsteht exakt derselbe, jedoch um die horizontale Achse gespiegelte Verlauf (Abb. 4.47).

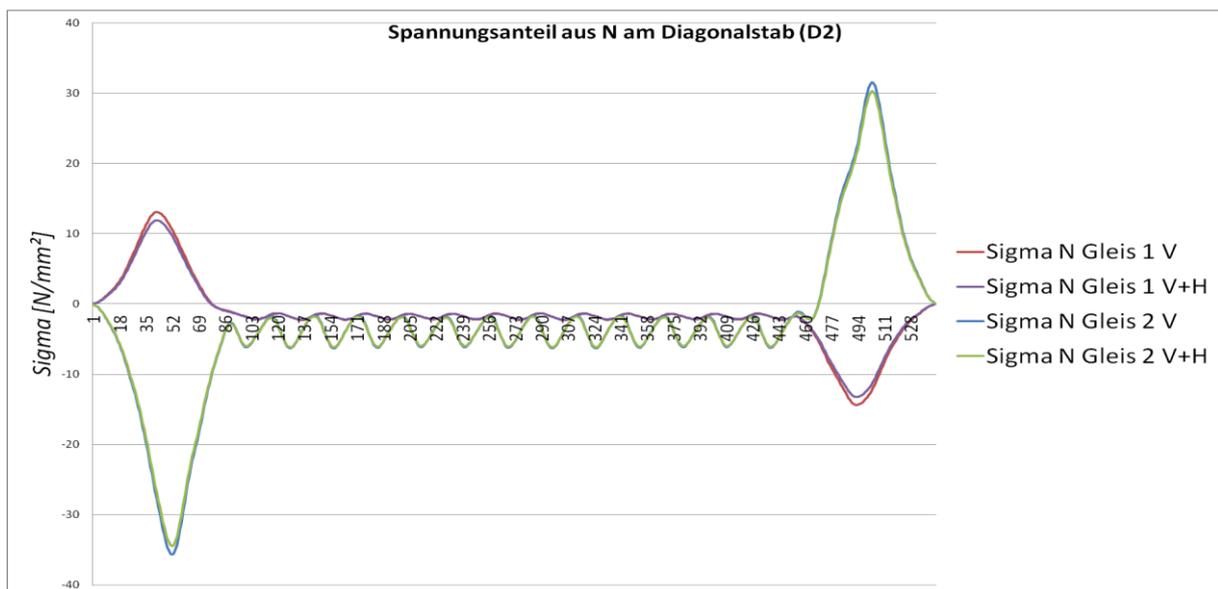


Abb. 4.47: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D2

Der Spannungsverlauf im Diagonalstab D3 ähnelt stark dem Spannungsverlauf der Untergurte U6 und U7, was aufgrund der Ähnlichkeiten der Einflusslinie auch plausibel ist (Abb. 4.48). Hier hat die Horizontallast wieder praktisch keine Auswirkung.

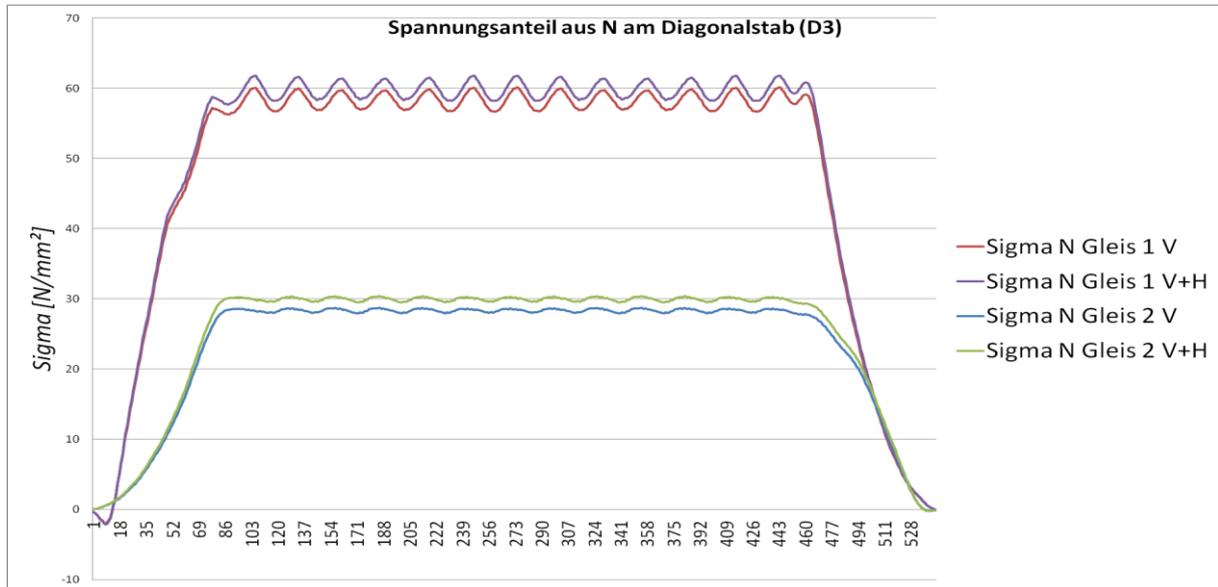


Abb. 4.48: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D3

In der Diagonale D4 entsteht durch die Überfahrt des Lastenzuges ein dem von D3 sehr ähnliches horizontal gespiegeltes Bild (Abb. 4.49). Die Horizontalkraft hat wieder nur sehr geringe Auswirkungen.

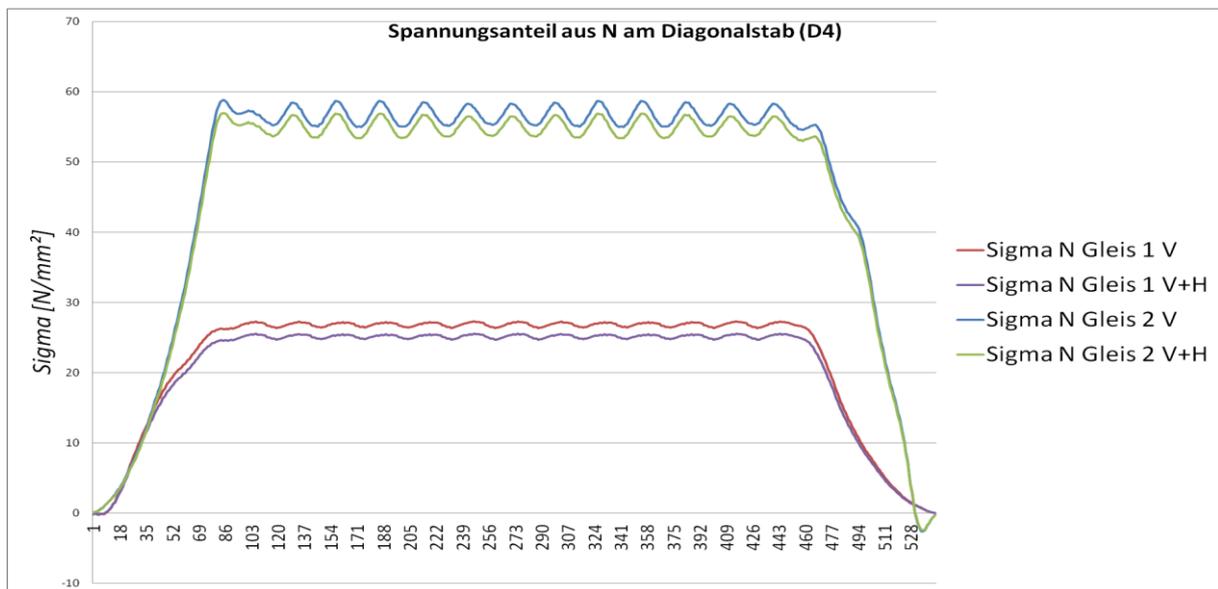


Abb. 4.49: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D4

4.3. Auswertung

4.3.1 Auswertung Lastmodell 71

Wie bereits in 4.1 dargestellt sind für die Berechnung des Einstufenkollektives des Lastmodells 71 nur der minimale und der maximale Spannungswert im Bauteil und einige Faktoren notwendig. Aufgrund dieser einfachen Berechnungsweise konnte die Auswertung der Berechnungsergebnisse mit Microsoft Excel durchgeführt werden. Da die automatisierte feldweise Lastaufstellung beim Lastmodell 71 erst erfolgte, als ein Großteil der weiteren Berechnung im Excel bereits fertig gestellt oder zumindest vorbereitet war, wurden die Ergebnisse zuerst in Tabelle 4.1 zusammengefasst und danach in die vorbereitete Datei eingefügt. Die vorbereitete Datei arbeitete zu diesem Zeitpunkt mit den Daten der Überfahrt des Lastenzugs und mit einigen manuell hinzugefügten Lastfällen mit feldweisen Lasten und verwendete automatisch nur die maximalen und minimalen Schnittkräfte aus der Liste. Darum musste die Liste nur um je zwei Zeilen pro Punkt erweitert werden um die Berechnung neu durchzuführen. Gleichzeitig diente diese Schnittkraftliste als Kontrolle der neuen Lastfälle. Bei den Punkten der maßgebenden Vollast mussten die maximalen und minimalen Werte der unterschiedlich erstellten Lastfälle übereinstimmen, bei den anderen Punkten mussten die neuen Werte die bereits vorhandenen übersteigen.

Punkte	Nummer	Gleis 1				Gleis 2			
		max N	zugehörige Lastfälle	min N	zugehörige Lastfälle	max N	zugehörige Lastfälle	min N	zugehörige Lastfälle
U1/U2	2788	2.557,51	3055, 4002-4101	0,00	-	1.546,86		-1,06	
U3	2789	1.504,95		0,00		2.542,97	1056, 2002-2101	-0,07	
U6	2802	1.166,36	3021, 4001-4101	0,00	-	612,93		0,00	
U7	2804	615,34		0,00		1.194,53	1090, 2002-2102	0,00	
H4	2790	516,85	3055, 4001-4019, 4038-4064, 4083-4101	-35,36	3075, 4020-4037, 4065-4082	216,27		-17,85	
H5	2791	194,81		-14,95		501,82	1055, 2001-2019, 2038-2064, 2084-2100	-32,19	1075, 2020-2037, 2065-2083, 2101
D1	2814	568,31	3040, 4001-4046	-614,33	3063, 4047-4101	238,01		-268,38	
D2	2816	228,67		-249,63		557,27	1071, 2056-2101	-596,68	1048, 2001-2055
D3	2818	1.473,72	3032, 4012-4101	-56,15	3010, 4001-4011	698,28		-5,19	
D4	2820	663,82		-6,44		1.446,21	1080, 2001-2090	-67,21	1100, 2091-2101
		max M		min M		max M		min M	
Qges	2801	1.387,89	3075, 4005-4038, 4058-4084	-76,40	3095, 4001-4004, 4039-4057, 4085-4101	868,25		-46,54	
Lges	2794	93,87		-60,98		238,75	1030, 2001, 2020-	-89,44	1017, 2002-2019,
zugehörige N		38,27		2,62		8,53	2032, 2051-2101	1,98	2033-2050

Tabelle 4.1: Ausgelesene maximale und minimale Schnittkräfte

Da diese Bedingungen als erfüllt angesehen werden konnten, mussten nun noch die erforderlichen Berechnungsfaktoren ermittelt werden. Anhand der Norm wurden die Längen L_{ϕ} und L_{EN} festgelegt, die für die Berechnung von Φ_2 und λ_1 benötigt werden.

L_φ wurde anhand der Tabelle 6.2 aus der ÖNORM EN 1991-2 ermittelt. Für die Elemente des Hauptträgers, also Diagonalen und Untergurt, ergibt sich daraus eine maßgebende Länge von 60 m. Für den Längsträger als Teil eines Trägerrostes ist der Abstand durch den dreifachen Querträgerabstand, in diesem Fall 18 m, festgelegt. Für die Pfosten werden die Werte der Hänger verwendet, welche mit dem 4-fachen Abstand der Hänger, hier 24 m, festgelegt sind. Für die Querträger als Teil eines Trägerrostes muss die doppelte Länge der Querträger, hier 20,4 m, verwendet werden. Mithilfe dieser Längen wurde Φ_2 laut Gleichung 3.5 in Kapitel 3.4 berechnet.

Die Ermittlung von L_{EN} sowie λ_1 ist in Kapitel 9.5.3 der ÖNORM EN 1993-2 festgehalten. L_{EN} beschreibt die Einflusslänge für die Bauteile der Brücke und wird in der Norm über die Momenteneinflusslinie berechnet.

Für die Pfosten ist L_{EN} aus der Norm nicht klar ersichtlich, die Einflusslänge der Pfosten muss jedoch der doppelte Abstand der Querträger, also zwölf Meter, sein. Die Längsträger der Brücke entsprechen Durchlaufträgern, die auf den Querträgern gelagert sind. Somit muss L_{EN} gleich der Länge des betrachteten Feldes bzw. der Mittelwert der angrenzenden Felder sein, was in beiden Fällen sechs Metern entspricht. Für die Querträger ist die L_{EN} mit der Summe der Längen der beiden angrenzenden Felder festgelegt und beträgt somit zwölf Meter.

Bei den Elementen des Fachwerkträgers sind die Einflusslängen nicht direkt festgelegt, da die Norm immer von Vollwandträgern ausgeht. Für den Untergurt kann die Einflusslänge durch die Momenteneinflusslinie des gesamten Fachwerkträgers beschrieben werden und beträgt daher 60 m. L_{EN} der Diagonalen des Fachwerkträgers kann über die Querkrafteinflusslinie eines Vollwandträgers beschrieben werden. Diese ist dort mit 0,4-mal der Spannweite des gesamten Feldes festgelegt und beträgt daher 24m.

Die λ_1 -Werte sind in der Tabelle 9.3 der ÖNORM EN 1993-2 für verschiedene L_{EN} festgelegt. Für die benötigten Werte musste zwischen den gegebenen Werten interpoliert werden.

Tabelle 4.2 zeigt die Berechnungen des Betriebsfaktors Φ_2 und des Faktors λ_1 .

Bauteil	L_φ [m]	Φ_2	L_{EN}	λ_1	L_{EN} aus Einflusslinienberechnung	λ_1 mit wahren L_{EN}
Untergurt	60	1,01	60	0,63	60	0,63
Pfosten	24	1,12	12	0,84	16	0,73
Längsträger	18	1,16	6	1,03	8	0,92
Querträger	20,4	1,14	12	0,84	16	0,73
Diagonalstäbe D3/D4	60	1,01	24	0,67	54	0,63
Diagonalstäbe D1/D2	60	1,01	24	0,67	27	0,67

Tabelle 4.2: Berechnung von Φ_2 und λ_1

Am Ende wurde die wahre Einflusslänge aus der Einflusslinienberechnung für die Ermittlung von λ_1 verwendet um die Werte vergleichen zu können. Bereits die Einflusslängen werden in der Norm konservativ angenommen, wodurch auch durch eine reine Einflusslinienberechnung bereits bessere Ergebnisse zu erwarten sind.

Für den Vergleich der zweigleisigen Beanspruchung der beiden Lastmodelle musste außerdem noch der Schadensäquivalenzfaktor λ_4 berechnet werden, durch den die Anzahl der Gleise auf einer Brücke berücksichtigt wird.

λ_4 wird wie folgt berechnet:

$$\lambda_4 = \sqrt[n]{n + [n + 1][a^5 + (1 - a)^5]} \quad (4.1)$$

mit:
$$a = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_{1+2}}$$

Dabei ist.

- n..... Anteil der Begegnungshäufigkeit der Züge auf der Brücke
- $\Delta\sigma_1$ Spannungsdifferenz im Bauteil aufgrund der Überfahrten auf Gleis 1
- $\Delta\sigma_{1+2}$ Spannungsdifferenz im Bauteil aufgrund der Überfahrt auf beiden Gleisen

Der Anteil der Begegnungshäufigkeit der Züge auf der Brücke wurde mit $n = 0$ angesetzt. Für die Berechnung von $\Delta\sigma_{1+2}$ wurden die maximalen und minimalen Spannungen von jedem Gleis addiert und dann die Differenz gebildet.

Nachdem die Berechnung der Koeffizienten abgeschlossen war, konnten schlussendlich konnten die Spannungskollektive für das Lastmodell 71 ermittelt werden.

Messstelle	Gleis 1			Gleis 2			Gleis 1 + 2		
	max σ_v	min σ_v	$\Delta\sigma_{UIC,v}$	max σ_v	min σ_v	$\Delta\sigma_{UIC,v}$	max $\sigma_{UIC,1+2,v}$	min $\sigma_{UIC,1+2,v}$	$\Delta\sigma_{UIC,1+2,v}$
U1/U2	64,98	0,00	65,38	39,30	-0,03	39,57	104,28	-0,03	104,95
U3	38,24	0,00	38,47	64,61	0,00	65,01	102,84	0,00	103,48
U6	53,95	0,00	54,28	28,35	0,00	28,53	82,30	0,00	82,81
U7	28,46	0,00	28,64	55,25	0,00	55,60	83,71	0,00	84,23
H4	58,20	-3,98	69,35	24,35	-2,01	29,40	82,56	-5,99	98,75
H5	21,94	-1,68	26,34	56,51	-3,63	67,06	78,45	-5,31	93,40
L_{ges} (UG)	21,56	-12,32	39,35	49,40	-18,19	78,49	70,96	-30,51	117,84
Q_{ges} (OG)	4,57	-82,94	99,79	2,78	-51,89	62,34	7,35	-134,83	162,14
D1	43,85	-47,40	91,82	18,36	-20,71	39,32	62,22	-68,11	131,14
D2	17,64	-19,26	37,14	43,00	-46,04	89,59	60,64	-65,30	126,73
D3	72,81	-2,77	76,06	34,50	-0,26	34,97	107,31	-3,03	111,03
D4	32,80	-0,32	33,32	71,45	-3,32	75,24	104,25	-3,64	108,56

Tabelle 4.3: Berechnung der Spannungskollektive Lastmodell 71

ϕ_2	Zusammenfassung der Spannungskollektive		a	Schadensäquivalenzfaktoren				Messstelle
	$\Delta\sigma_{\text{UIC},1,v}$ [N/mm ²]	$\Delta\sigma_{\text{UIC},1+2,v}$ [N/mm ²]		$\lambda_{1,EC}$	$\lambda_{4,EC}$	$(\lambda_{1} * \lambda_{4})_{EC}$	$\lambda_{1,EC}$ mit wahren L_{EN}	
1,01	65,38	104,95	0,62	0,63	0,63	0,40	0,63	U1/U2
1,01	65,01	103,48	0,63	0,63	0,64	0,40	0,63	U3
1,01	54,28	82,81	0,66	0,63	0,66	0,42	0,63	U6
1,01	55,60	84,23	0,66	0,63	0,66	0,42	0,63	U7
1,12	69,35	98,75	0,70	0,84	0,70	0,59	0,73	H4
1,12	67,06	93,40	0,72	0,84	0,72	0,60	0,73	H5
1,16	78,49	117,84	0,67	1,03	0,67	0,69	0,92	L_{ges} (UG)
1,14	99,79	162,14	0,62	0,84	0,63	0,52	0,73	Q_{ges} (OG)
1,01	91,82	131,14	0,70	0,67	0,70	0,47	0,67	D1
1,01	89,59	126,73	0,71	0,67	0,71	0,47	0,67	D2
1,01	76,06	111,03	0,69	0,67	0,69	0,46	0,63	D3
1,01	75,24	108,56	0,69	0,67	0,70	0,46	0,63	D4

Tabelle 4.4: Berechnung der Spannungskollektive Lastmodell 71 (Fortsetzung)

Die in Tabelle 4.3 und Tabelle 4.4 dargestellten Spannungen wurden aus der vorherigen Berechnung übertragen und die Spannungsdifferenzen bereits mit dem Betriebsfaktor Φ_2 multipliziert. In den übrigen Spalten wurden die bisher berechneten Faktoren für die einzelnen Punkte zusammengefasst.

4.3.2 Auswertung Lastmodell Betriebszüge

Für die Auswertung der Betriebszüge wurden die Schnittkrafteergebnisse aus RSTAB exportiert und mit einem Java-Programm gefiltert, um nur die Ergebnisse der Untersuchungspunkte zu erhalten. Aus den Schnittkräften konnten mithilfe der Querschnittswerte die Spannungen berechnet werden. Daraus ergab sich eine Liste an Spannungen, die in einem Diagramm als Spannungsverlauf dargestellt werden konnten. Daraus ergab sich für jeden Zugtyp und jeden Bauteil ein Spannungsverlauf. Für eine Darstellung in dieser Arbeit wurden nur jene ausgewählt, für die weitere Untersuchungen durchgeführt wurden, die anderen dienen der Kontrolle, da es sich überwiegend um gespiegelte Punkte handelt. Die Verläufe von drei Zugtypen wurden bereits in Kapitel 4.2 dargestellt, die anderen fünf werden im Anhang D dargestellt. Danach wurden die Spannungswerte mit dem Betriebsbeiwert für Betriebszüge Φ_{BZ} multipliziert. Die Berechnung von Φ_{BZ} ist in

Tabelle 4.5: Berechnung Φ_{BZ} für Lastenzug Typ 2

dargestellt.

v	160 [km/h]								
	44,44 [m/s]								
Bauteil	L_{φ} [m]	ϕ_2	LEN	λ_1	K	ϕ'	ϕ''	ϕ_{BZ}	
Untergurt	60	1,01	60	0,63	0,18	0,22	0,00	1,11	
Pfosten	24	1,12	12	0,84	0,26	0,35	0,00	1,17	
Längsträger	18	1,16	6	1,03	0,28	0,38	0,02	1,20	
Querträger	20,4	1,14	12	0,84	0,28	0,38	0,01	1,19	
Diagonalstäbe D3/D4	60	1,01	24	0,67	0,18	0,22	0,00	1,11	
Diagonalstäbe D1/D2	60	1,01	24	0,67	0,18	0,22	0,00	1,11	

Tabelle 4.5: Berechnung Φ_{BZ} für Lastenzug Typ 2

Daraufhin erfolgte die Auszählung der Spannungsverläufe mit dem Programm MATLAB nach der Rainflow-Methode. Die Klasseneinteilung erfolgte in 1 N/mm² - Schritten. Die daraus entstandenen Spannungskollektive wurden ebenfalls mit MATLAB anhand der „Verkehrszusammenstellung Regelverkehr“ in Abb. 3.10 addiert und auf eine Lebensdauer von 100 Jahren aufgerechnet. Für die Lastfälle mit der Belastung auf beiden Gleisen wurden die Spannungskollektive von der eingleisigen Belastung addiert, was einer Superpositionierung der beiden Lastfälle entspricht und aufgrund der linear elastischen Berechnung zulässig ist. Somit ergab sich für jeden Untersuchungspunkt ein Spannungskollektiv je Lastfall.

In den folgenden Abbildungen (Abb. 4.50 bis Abb. 4.61) werden die Spannungskollektive für die beiden Lastfälle „Gleis 1+2 V“ und „Gleis 1+2 V+H“ dargestellt. Ebenfalls zu sehen sind die Wöhlerlinien für die zugehörigen Kerbfälle. Durch die übliche doppellogarithmische

Darstellung erscheint diese als Gerade. Die maßgebenden Kerbfälle wurden in einem Gutachten der Brücke erfasst und für diese Arbeit übernommen.

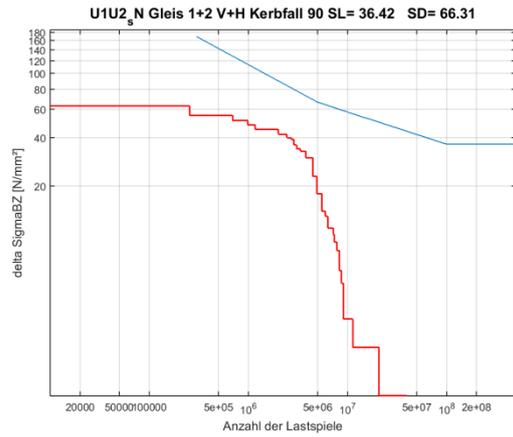
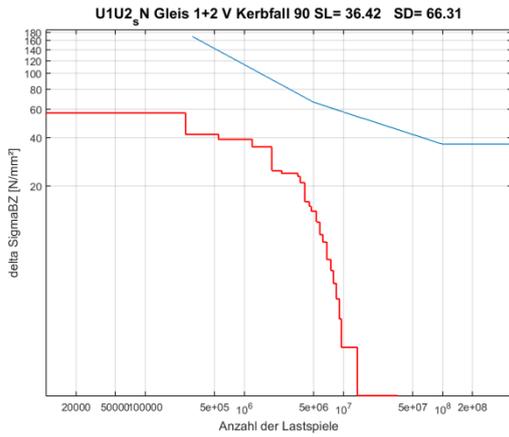


Abb. 4.50: Spannungskollektive für Untergurt U1/U2

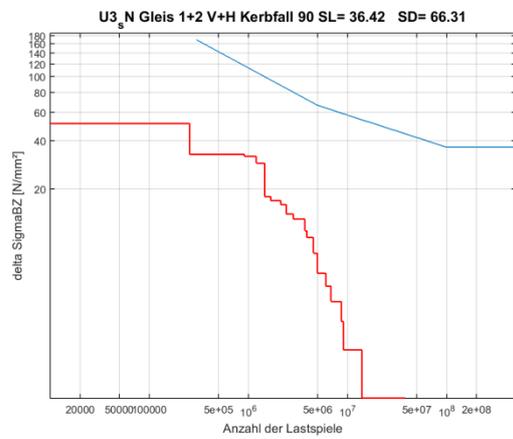
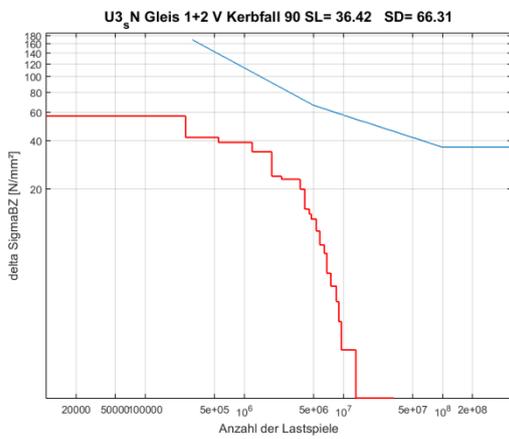


Abb. 4.51: Spannungskollektive für Untergurt U3

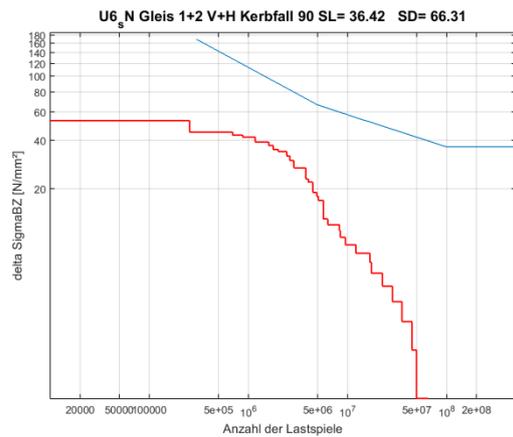
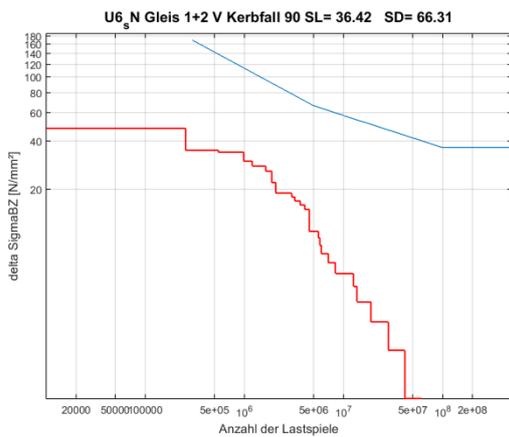


Abb. 4.52: Spannungskollektive für Untergurt U6

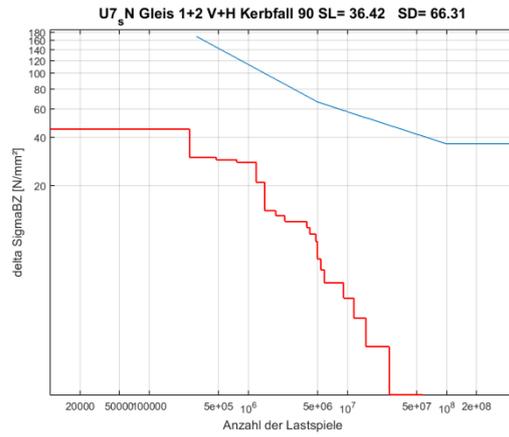
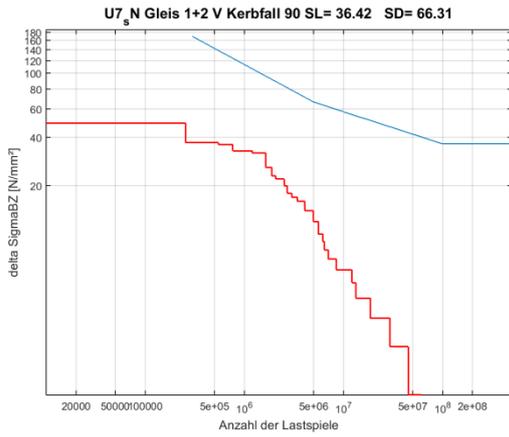


Abb. 4.53: Spannungskollektive für Unterfurt U7

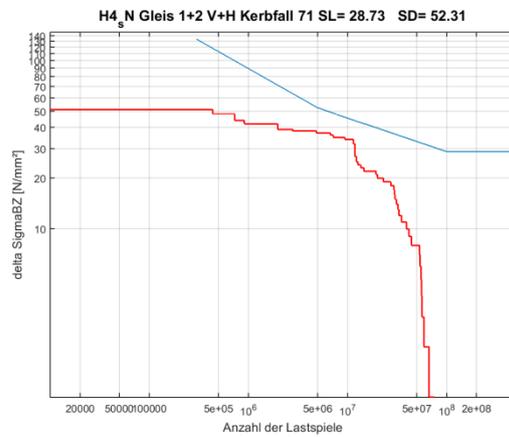
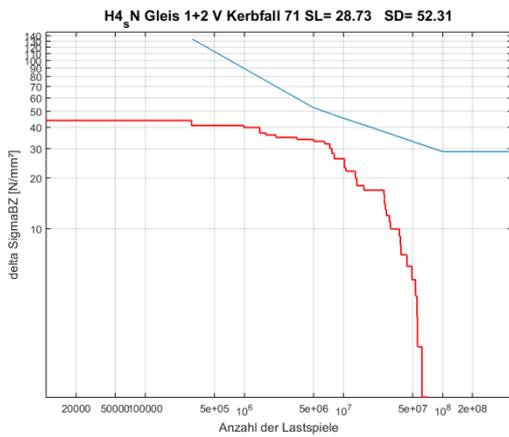


Abb. 4.54: Spannungskollektive für Pfosten H4

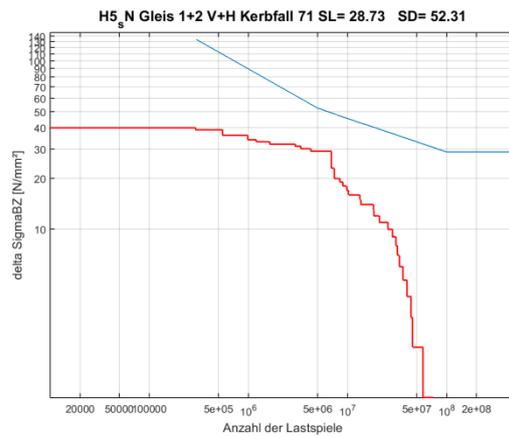
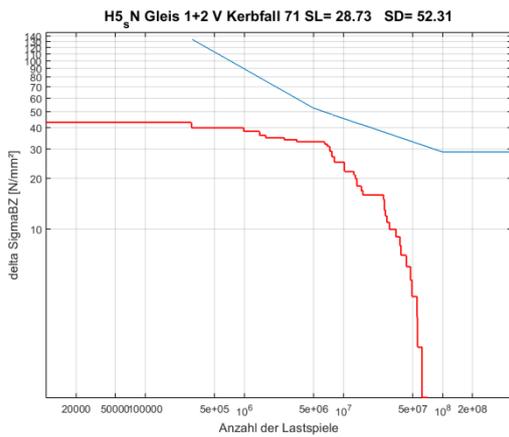


Abb. 4.55: Spannungskollektive für Pfosten H5

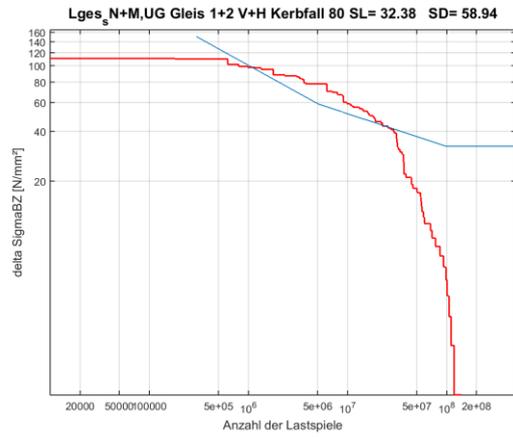
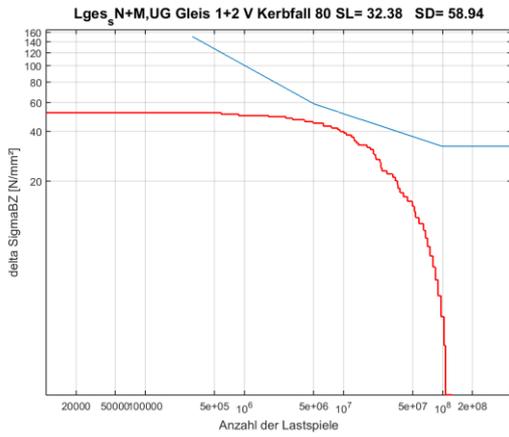


Abb. 4.56: Spannungskollektive für Längsträger L_{ges}

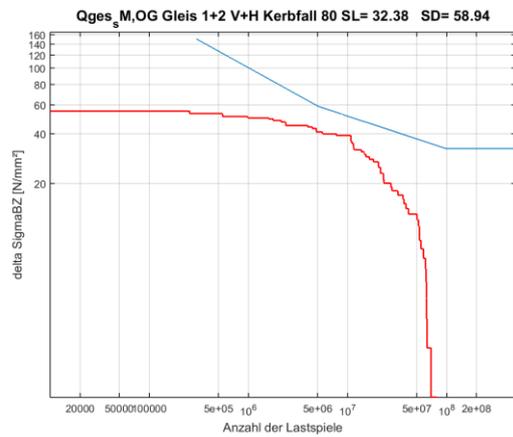
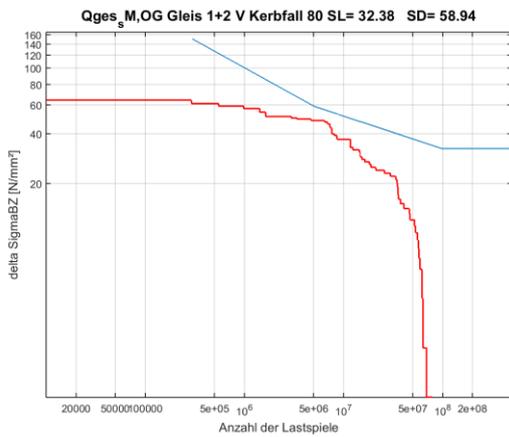


Abb. 4.57: Spannungskollektive für Querträger Q_{ges}

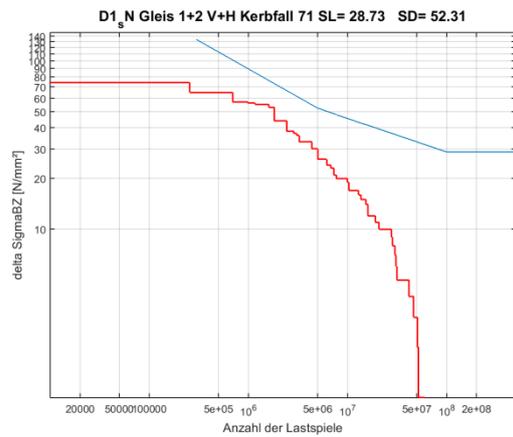
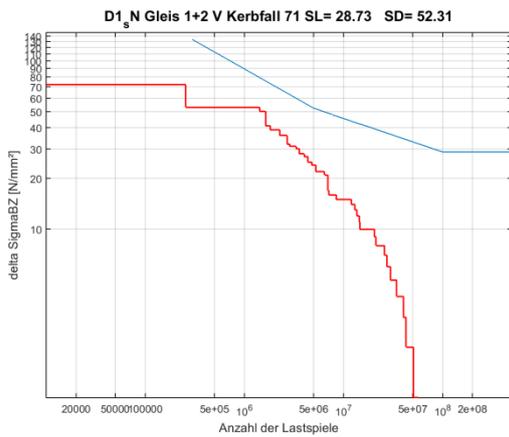


Abb. 4.58: Spannungskollektive für Diagonale $D1$

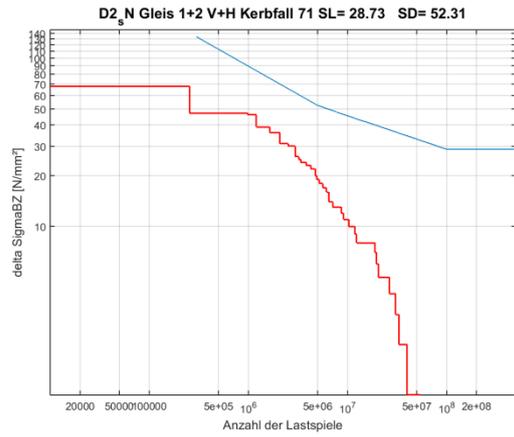
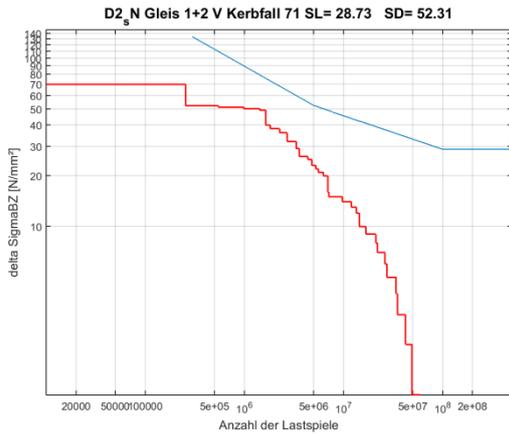


Abb. 4.59: Spannungskollektive für Diagonale D2

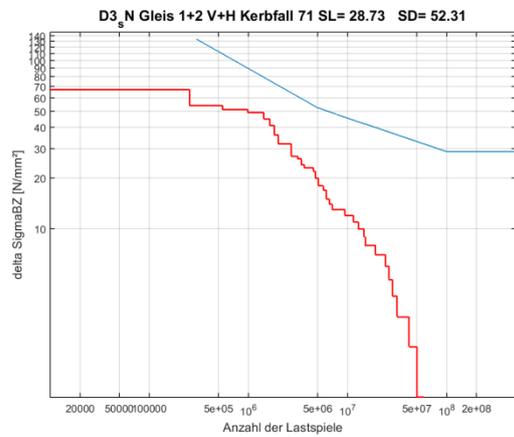
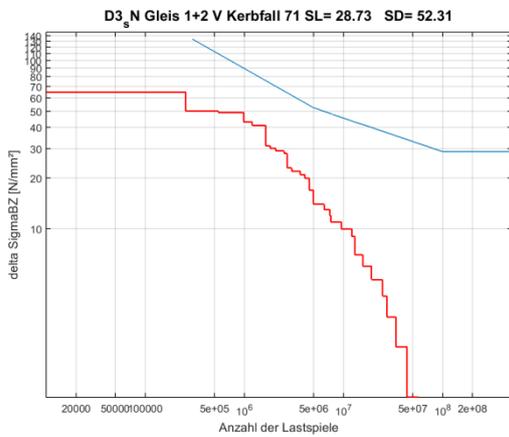


Abb. 4.60: Spannungskollektive für Diagonale D3

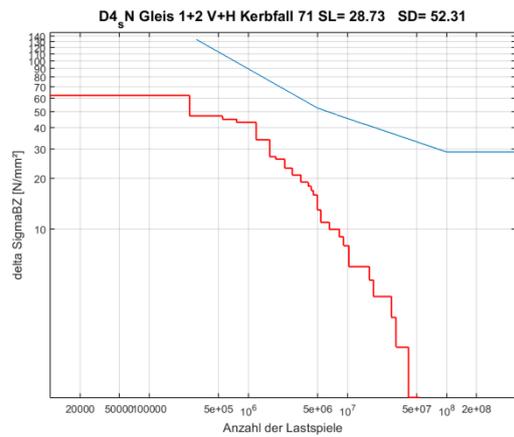
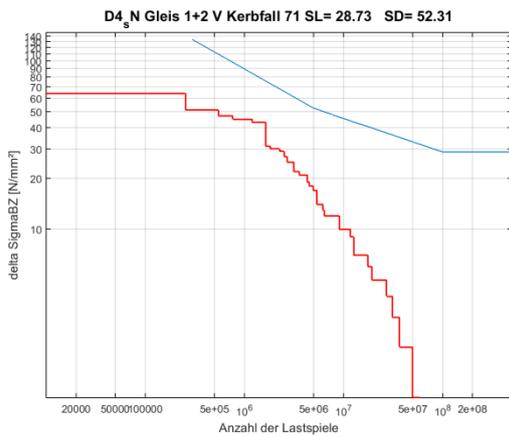


Abb. 4.61: Spannungskollektive für Diagonale D4

Das Plateau an der linken Seite des Diagramms mit dem anschließenden relativ großen Spannungssprung zum nächsten Spannungslevel, der bei beinahe jedem Bauteil zu erkennen ist, ist auf die hohe Last des Lastenzugs Typ 5 zurückzuführen. Dieser bewirkt zwar insgesamt nicht sehr viele Lastwechsel, wie bereits in den Spannungsverläufen zu sehen war, jedoch tritt jeder mit einem sehr hohen Wert auf. In Abb. 4.56 ist zu erkennen, dass der Ermüdungsnachweise für den Längsträger mit Berücksichtigung der Horizontalkraft mit Sicherheit nicht erfüllt werden kann, da die Spannungskollektive deutlich über der Wöhlerlinie liegen.

Des Weiteren kann man am Vergleich der Diagramme der beiden Lastfälle jeder Abbildung erkennen, ob die Berücksichtigung der Horizontalkräfte günstige oder ungünstige Auswirkungen auf den Bauteil hat.

Als nächster Schritt wurden die Spannungskollektive in schadensäquivalente Einstufenkollektive umgerechnet. Dies erfolgte über die Ermittlung der Teilschädigung aufgrund der einzelnen Spannungsniveaus. Diese wurde addiert und danach ein Spannungsniveau ermittelt, welches bei der gleichen Anzahl an Lastwechseln die gleiche Schädigung im Bauteil hervorruft.

Um die Berechnung mit der des Lastmodells 71 vergleichen zu können, wurde das Einstufenkollektiv anschließend auf zwei Millionen Lastwechsel umgerechnet.

Mit den in Abb. 4.62 dargestellten Formeln konnten alle benötigten Werte der Wöhlerlinien berechnet werden. Die Teilschädigung errechnet sich durch die Division der auftretenden Lastwechsel durch die auf demselben Spannungsniveau maximal ertragbaren Lastwechsel.

- Ermittlung von $\Delta\sigma_R(N_R)$:

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_C^m 2 \cdot 10^6 \quad \text{mit } m = 3 \text{ für } N \leq 5 \cdot 10^6$$

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_D^m 5 \cdot 10^6 \quad \text{mit } m = 5 \text{ für } 5 \cdot 10^6 \leq N \leq 10^8$$

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{1/3} \cdot \Delta\sigma_C = 0,737 \cdot \Delta\sigma_C \quad \dots \text{ Dauerfestigkeit}$$

$$\Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{1/5} \cdot \Delta\sigma_D = 0,549 \cdot \Delta\sigma_D = 0,405 \cdot \Delta\sigma_C$$

$\Delta\sigma_L$... Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit

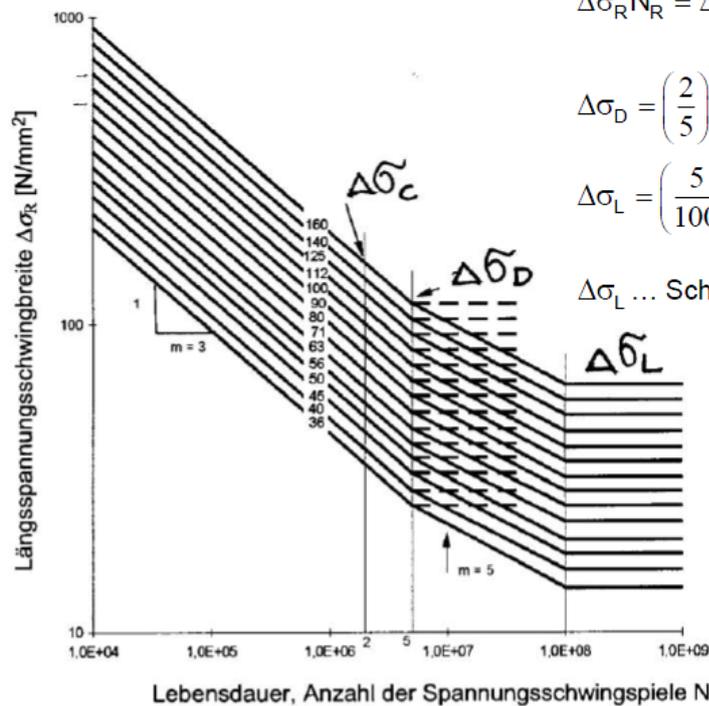


Abb. 4.62: Normierte Ermüdungsfestigkeitslinien und Berechnungsformeln ^[3]

Am Ende der MATLAB-Berechnung stand wieder eine Excel-Tabelle in der die gewünschten Werte ausgegeben wurden. Unter anderem waren dies die Anzahl der Lastwechsel in 100 Jahren, das schadensäquivalente Einstufenkollektiv für 100 Jahre oder die pro Jahr auftretende Schädigung im Bauteil. Für einen Vergleich der beiden Ergebnisse der Lastmodelle wurde jedoch nur die Höhe des schadensäquivalenten Einstufenkollektives für zwei Millionen Lastwechsel am Bauteil erforderlich, sodass für die Endtabelle wieder viele Daten entfernt werden konnten.

5 Ergebnisse

Die Auswertung der Ergebnisse wurde so angelegt, dass der aus dem Lastmodell 71 errechnete Faktor λ_1 mit dem tatsächlichen Wert aus der Berechnung des Lastmodells Betriebszüge verglichen wird. Verglichen werden damit die Lastfälle der vertikalen und horizontalen Last auf jeweils einem Gleis bezogen immer auf die rein vertikale Last des Lastmodells 71 auf einem Gleis. Für einen zweiten Vergleich wurden die Ergebnisse aus der Berechnung der Lastaufstellung auf beiden Gleisen herangezogen. Hier ist jedoch das reale λ_1 nicht mehr rein bestimmbar, worauf λ_4 in den Vergleich mit einbezogen werden musste.

Da es sich bei den Berechnungen dieser Arbeit um Vergleichsrechnungen handelt können Teilsicherheitsfaktoren und Abminderungsfaktoren in den einzelnen Formeln überwiegend auf 1,0 gesetzt werden.

Somit ergeben sich die neuen Berechnungsformeln mit:

$$\Delta\sigma_{71} * \Phi_2 * \lambda_1 * \lambda_4 \leq \Delta\sigma_c \quad (5.1)$$

$$\Delta\sigma_e * \Phi_{BZ} \leq \Delta\sigma_c \quad (5.2)$$

Die Formel für die Berechnung der realen Faktoren $\lambda_{1,\text{exakt}}$ und $\lambda_{4,\text{exakt}}$ lautet somit:

$$\lambda_{1,\text{exakt}} * \lambda_{4,\text{exakt}} = \frac{\Delta\sigma_e * \Phi_{BZ}}{\Delta\sigma_{71} * \Phi_2} \quad (5.3)$$

Für die eingleisige Berechnung wird $\lambda_{4,\text{exakt}} = 1,0$ gesetzt.

In den folgenden Tabellen (Tabelle 5.1 bis Tabelle 5.4) sind die Ergebnisse der Berechnungen zusammengefasst dargestellt. Enthalten sind der Vergleich mit den Belastungen auf einem Gleis oder auf beiden Gleisen, die Auswirkungen einer Einflusslinienberechnung und der damit verbundenen Verwendung der wahren Einflusslänge, sowie die Veränderung der Lebensdauer bei der Berechnung mit Lastmodell Betriebszüge anstatt Lastmodell 71. Außerdem sind in der Tabelle bezüglich der Gleise nur die Lastfälle eingetragen die für das Bauteil maßgebend werden, sowie jene bei denen beide Gleise belastet werden.

Auswertungspunkt	Berechnete Spannungskollektive aus Lastmodell Betriebszüge und Lastmodell 71			Vergleich mit Belastung auf einem Gleis			Vergleich mit Belastung auf beiden Gleisen			
	$\Delta\sigma_{e,N=2*10^6}$ [N/mm ²]	$\Delta\sigma_{UIC,1,v}$	$\Delta\sigma_{UIC,1+2,v}$	$\lambda_{1,exakt} = \frac{\Delta\sigma_{e,N=2*10^6}}{(\Delta\sigma_{UIC,1,v} * \phi_2)}$	$\lambda_{1,EC}$ aus UIC-Berechnung	Verhältnis $\frac{\lambda_{1,exakt}}{\lambda_{1,EC}}$	$(\lambda_1 * \lambda_4)_{exakt} = \frac{\Delta\sigma_{e,N=2*10^6}}{(\Delta\sigma_{UIC,1+2,v} * \phi_2)}$	$\lambda_{4,EC}$ aus UIC-Berechnung	$(\lambda_1 * \lambda_4)_{EC}$ aus UIC-Berechnung	Verhältnis $\frac{(\lambda_1 * \lambda_4)_{exakt}}{(\lambda_1 * \lambda_4)_{EC}}$
U1/U2 Gleis 1 V	30,57	65,38		0,47	0,63	0,74				
U1/U2 Gleis 1 V+H	44,52	65,38		0,68	0,63	1,08				
U1/U2 Gleis 1+2 V	30,57		104,95		0,63		0,29	0,63	0,40	0,73
U1/U2 Gleis 1+2 V+H	46,36		104,95		0,63		0,44	0,63	0,40	1,11
U3 Gleis 2 V	30,57	65,01		0,47	0,63	0,75				
U3 Gleis 2 V+H	21,56	65,01		0,33	0,63	0,53				
U3 Gleis 1+2 V	30,57		103,48		0,63		0,30	0,64	0,40	0,74
U3 Gleis 1+2 V+H	21,56		103,48		0,63		0,21	0,64	0,40	0,52
U6 Gleis 1 V	19,49	54,28		0,36	0,63	0,57				
U6 Gleis 1 V+H	32,61	54,28		0,60	0,63	0,95				
U6 Gleis 1+2 V	19,49		82,81		0,63		0,24	0,66	0,42	0,57
U6 Gleis 1+2 V+H	32,61		82,81		0,63		0,39	0,66	0,42	0,95
U7 Gleis 2 V	21,90	55,60		0,39	0,63	0,63				
U7 Gleis 2 V+H	17,50	55,60		0,31	0,63	0,50				
U7 Gleis 1+2 V	21,90		84,23		0,63		0,26	0,66	0,42	0,62
U7 Gleis 1+2 V+H	17,50		84,23		0,63		0,21	0,66	0,42	0,50
H4 Gleis 1 V	43,48	69,35		0,63	0,84	0,75				
H4 Gleis 1 V+H	57,01	69,35		0,82	0,84	0,98				
H4 Gleis 1+2 V	43,48		98,75		0,84		0,44	0,70	0,59	0,75
H4 Gleis 1+2 V+H	57,01		98,75		0,84		0,58	0,70	0,59	0,98
H5 Gleis 2 V	41,82	67,06		0,62	0,84	0,75				
H5 Gleis 2 V+H	35,18	67,06		0,52	0,84	0,63				
H5 Gleis 1+2 V	41,82		93,40		0,84		0,45	0,72	0,60	0,74
H5 Gleis 1+2 V+H	35,18		93,40		0,84		0,38	0,72	0,60	0,63

Tabelle 5.1: Darstellung der Berechnungsergebnisse (1/4)

Darstellung der Auswirkungen einer Einflusslinienberechnung					Auswirkung der Spannungsveränderung auf die Lebensdauer	
$\lambda_{1,EC,LEN}$ aus UIC-Berechnung mit L_{EN} aus Einflusslinienberechnung	$(\lambda_1 * \lambda_4)_{EC,LEN}$ aus UIC-Berechnung	Verhältnis $\lambda_{1,EC,LEN} / \lambda_{1,EC}$	Verhältnis $\lambda_{1,exakt} / \lambda_{1,EC,LEN}$	Verhältnis $(\lambda_1 * \lambda_4)_{exakt} / (\lambda_1 * \lambda_4)_{EC,LEN}$	η_{LD} : Faktor für Verlängerung der Gesamtlebensdauer LD_{neu} / LD_{EC}	Auswertungspunkt
0,63			0,74		2,45	U1/U2 Gleis 1 V
0,63		1,00	1,08		0,79	U1/U2 Gleis 1 V+H
0,63	0,40			0,73	2,56	U1/U2 Gleis 1+2 V
0,63	0,40			1,11	0,74	U1/U2 Gleis 1+2 V+H
0,63			0,75		2,41	U3 Gleis 2 V
0,63		1,00	0,53		6,85	U3 Gleis 2 V+H
0,63	0,40			0,74	2,51	U3 Gleis 1+2 V
0,63	0,40			0,52	7,15	U3 Gleis 1+2 V+H
0,63			0,57		5,40	U6 Gleis 1 V
0,63		1,00	0,95		1,15	U6 Gleis 1 V+H
0,63	0,42			0,57	5,53	U6 Gleis 1+2 V
0,63	0,42			0,95	1,18	U6 Gleis 1+2 V+H
0,63			0,63		4,09	U7 Gleis 2 V
0,63		1,00	0,50		8,01	U7 Gleis 2 V+H
0,63	0,42			0,62	4,18	U7 Gleis 1+2 V
0,63	0,42			0,50	8,19	U7 Gleis 1+2 V+H
0,73			0,85		2,37	H4 Gleis 1 V
0,73		0,88	1,12		1,05	H4 Gleis 1 V+H
0,73	0,52			0,85	2,39	H4 Gleis 1+2 V
0,73	0,52			1,12	1,06	H4 Gleis 1+2 V+H
0,73			0,85		2,41	H5 Gleis 2 V
0,73		0,88	0,71		4,04	H5 Gleis 2 V+H
0,73	0,53			0,85	2,42	H5 Gleis 1+2 V
0,73	0,53			0,71	4,06	H5 Gleis 1+2 V+H

Tabelle 5.2: Darstellung der Berechnungsergebnisse (2/4)

Auswertungspunkt	Berechnete Spannungskollektive aus Lastmodell Betriebszüge und Lastmodell 71			Vergleich mit Belastung auf einem Gleis			Vergleich mit Belastung auf beiden Gleisen			
	$\Delta\sigma_{e,N=2*10^6}$ [N/mm ²]	$\Delta\sigma_{UIC,1,v}$	$\Delta\sigma_{UIC,1+2,v}$	$\lambda_{1,exakt} = \frac{\Delta\sigma_{e,N=2*10^6}}{(\Delta\sigma_{UIC,1,v} * \phi_2)}$	$\lambda_{1,EC}$ aus UIC-Berechnung	Verhältnis $\frac{\lambda_{1,exakt}}{\lambda_{1,EC}}$	$(\lambda_1 * \lambda_4)_{exakt} = \frac{\Delta\sigma_{e,N=2*10^6}}{(\Delta\sigma_{UIC,1+2,v} * \phi_2)}$	$\lambda_{4,EC}$ aus UIC-Berechnung	$(\lambda_1 * \lambda_4)_{EC}$ aus UIC-Berechnung	Verhältnis $\frac{(\lambda_1 * \lambda_4)_{exakt}}{(\lambda_1 * \lambda_4)_{EC}}$
Qges Gleis 1 V	75,60	99,79		0,76	0,84	0,91				
Qges Gleis 1 V+H	54,95	99,79		0,55	0,84	0,66				
Qges Gleis 1+2 V	76,59		162,14		0,84		0,47	0,63	0,52	0,90
Qges Gleis 1+2 V+H	64,31		162,14		0,84		0,40	0,63	0,52	0,76
Lges Gleis 2 V	71,12	78,49		0,91	1,03	0,88				
Lges Gleis 2 V+H	152,97	78,49		1,95	1,03	1,89				
Lges Gleis 1+2 V	71,12		117,84		1,03		0,60	0,67	0,69	0,87
Lges Gleis 1+2 V+H	152,97		117,84		1,03		1,30	0,67	0,69	1,88
D1 Gleis 1 V	55,01	91,82		0,60	0,67	0,90				
D1 Gleis 1 V+H	62,33	91,82		0,68	0,67	1,02				
D1 Gleis 1+2 V	55,13		131,14		0,67		0,42	0,70	0,47	0,90
D1 Gleis 1+2 V+H	62,82		131,14		0,67		0,48	0,70	0,47	1,02
D2 Gleis 2 V	52,71	89,59		0,59	0,67	0,88				
D2 Gleis 2 V+H	45,68	89,59		0,51	0,67	0,76				
D2 Gleis 1+2 V	52,82		126,73		0,67		0,42	0,71	0,47	0,88
D2 Gleis 1+2 V+H	45,68		126,73		0,67		0,36	0,71	0,47	0,76
D3 Gleis 1 V	45,16	76,06		0,59	0,67	0,89				
D3 Gleis 1 V+H	50,34	76,06		0,66	0,67	0,99				
D3 Gleis 1+2 V	45,35		111,03		0,67		0,41	0,69	0,46	0,89
D3 Gleis 1+2 V+H	50,55		111,03		0,67		0,46	0,69	0,46	0,99
D4 Gleis 2 V	44,90	75,24		0,60	0,67	0,89				
D4 Gleis 2 V+H	40,30	75,24		0,54	0,67	0,80				
D4 Gleis 1+2 V	45,06		108,56		0,67		0,42	0,70	0,46	0,89
D4 Gleis 1+2 V+H	40,30		108,56		0,67		0,37	0,70	0,46	0,80

Tabelle 5.3: Darstellung der Berechnungsergebnisse (3/4)

Darstellung der Auswirkungen einer Einflusslinienberechnung					Auswirkung der Spannungsveränderung auf die Lebensdauer	
$\lambda_{1,EC,LEN}$ aus UIC-Berechnung mit L_{EN} aus Einflusslinienberechnung	$(\lambda_1 * \lambda_4)_{EC,LEN}$ aus UIC-Berechnung	Verhältnis $\lambda_{1,EC,LEN} / \lambda_{1,EC}$	Verhältnis $\lambda_{1,exakt} / \lambda_{1,EC,LEN}$	Verhältnis $(\lambda_1 * \lambda_4)_{exakt} / (\lambda_1 * \lambda_4)_{EC,LEN}$	η_{LD} : Faktor für Verlängerung der Gesamtlebensdauer LD_{neu} / LD_{EC}	Auswertungspunkt
0,73			1,03		1,34	Qges Gleis 1 V
0,73		0,88	0,75		3,49	Qges Gleis 1 V+H
0,73	0,46			1,03	1,36	Qges Gleis 1+2 V
0,73	0,46			0,86	2,30	Qges Gleis 1+2 V+H
0,92			0,98		1,47	Lges Gleis 2 V
0,92		0,89	2,12		0,15	Lges Gleis 2 V+H
0,92	0,62			0,98	1,50	Lges Gleis 1+2 V
0,92	0,62			2,11	0,15	Lges Gleis 1+2 V+H
0,67			0,90		1,38	D1 Gleis 1 V
0,67		1,00	1,02		0,95	D1 Gleis 1 V+H
0,67	0,47			0,90	1,39	D1 Gleis 1+2 V
0,67	0,47			1,02	0,94	D1 Gleis 1+2 V+H
0,67			0,88		1,46	D2 Gleis 2 V
0,67		1,00	0,76		2,25	D2 Gleis 2 V+H
0,67	0,47			0,88	1,46	D2 Gleis 1+2 V
0,67	0,47			0,76	2,26	D2 Gleis 1+2 V+H
0,63			0,94		1,42	D3 Gleis 1 V
0,63		0,94	1,05		1,03	D3 Gleis 1 V+H
0,63	0,43			0,94	1,42	D3 Gleis 1+2 V
0,63	0,43			1,05	1,03	D3 Gleis 1+2 V+H
0,63			0,95		1,40	D4 Gleis 2 V
0,63		0,94	0,85		1,94	D4 Gleis 2 V+H
0,63	0,44			0,95	1,40	D4 Gleis 1+2 V
0,63	0,44			0,85	1,96	D4 Gleis 1+2 V+H

Tabelle 5.4: Darstellung der Berechnungsergebnisse (4/4)

5.1. Ergebnisdiskussion

Da der absolute Wert von λ_{exakt} auf den ersten Blick nicht sehr aussagekräftig ist, wurde in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bis Tabelle 5.4 auch das Verhältnis von λ_{exakt} zu λ_{EC} dargestellt, wodurch sofort ersichtlich wird um wie viel Prozent sich das Spannungsniveau ändert, wenn man anstatt des Lastmodells 71 das Lastmodell der Betriebszüge verwendet.

5.1.1 Untergurt U1/U2

Betrachtet man nur die Vertikalbelastung, hat ein Betriebszug, der bei der Überfahrt auf Gleis 2 keinen Einfluss auf die Ermüdungsbelastung des Bauteils. Dies erkennt man daran, dass das schadenäquivalente Einstufenkollektiv für die Belastung auf Gleis 1 das gleiche Spannungsniveau erreicht wie auch für die Belastung auf beiden Gleisen.

Beim Vergleich der beiden Lastmodelle entsteht bei einer Berechnung nur mit vertikalen Lasten eine Verminderung des Spannungsniveaus um 26 Prozent bei eingleisiger, sowie um 27 Prozent bei zweigleisiger Belastung. Für die rechnerische Gesamtlebensdauer haben diese Verminderungen der Spannungen eine Verlängerung um etwa 150 Prozent zur Folge.

Wenn jedoch die horizontale Belastung mit in die Berechnung einfließt, ist die Berechnung laut Lastmodell 71 auf der unsicheren Seite. Das Spannungsniveau für den Nachweis müsste um acht bzw. elf Prozent erhöht werden. Für die rechnerische Gesamtlebensdauer des Bauteils bedeutet die Erhöhung der Spannungsniveaus eine Reduktion um 21 bzw. 26 Prozent.

Eine Einflusslinienberechnung für diesen Bauteil bringt keine Verbesserung, da es dieselbe ist, die sich auch aus der Berechnung mit der Norm ergibt.

5.1.2 Untergurt U3

An diesem Bauteil ist die Höhe der Spannungskollektive, laut der Berechnung mit dem Lastmodell der Betriebszüge, bei einem und bei beiden befahrenen Gleisen gleich hoch, was bedeutet, dass Gleis 1 nie einen Einfluss für die Ermüdung des Bauteils hat.

Bei der Vergleichsrechnung ergibt sich wieder eine Spannungsverminderung von 25 bzw. 26 Prozent für die Berechnung mit dem Lastmodell der Betriebszüge. Dies erhöht die rechnerische Gesamtlebensdauer wieder etwa um 150 Prozent.

Die horizontale Belastung hat hier einen günstigen Einfluss auf die Spannungen im Bauteil und vermindert diese. Durch die Berechnung mit dem Lastmodell 71 wird die Ermüdungslast somit sehr stark überschätzt. Die Reduktion des Spannungsniveaus durch die Berechnung mit der Horizontallast beläuft sich auf beinahe 50 Prozent, was eine Verlängerung der Lebensdauer von etwa 600 Prozent zur Folge hat.

Eine Einflusslinienberechnung hat auch hier keine Auswirkungen, da die Einflusslänge aus der Norm bereits der wahren einen Einflusslänge entspricht.

5.1.3 Untergurt U6

Auch an diesem Punkt hat, laut Berechnung mit dem Lastmodell der Betriebszüge, wieder nur ein Gleis Einfluss auf die Ermüdungsberechnung, diesmal Gleis 1.

Der Vergleich ergibt hier jeweils eine Verbesserung bzw. eine Verminderung des Spannungsniveaus um 43 Prozent, was die Lebensdauer um etwa 450 Prozent erhöhen würde.

Bei der Miteinbeziehung der Horizontallasten passen die Werte der beiden Lastmodelle recht genau zusammen. Die Berechnung mit dem Lastmodell der Betriebszüge mit Horizontalkräften im Vergleich zum Lastmodell 71 ergibt eine Verminderung der Spannung um 5 Prozent. Auf die Lebensdauer hat jedoch bereits diese geringe Abminderung Auswirkungen in Form einer Verlängerung um etwa 15 Prozent.

Die Einflusslinienberechnung bringt auch bei diesem Bauteil keine Verbesserung, da auch durch die Norm die wahre Einflusslänge verwendet wird.

5.1.4 Untergurt U7

Am Untergurt U7 hat, laut Berechnung mit dem Lastmodell der Betriebszüge, nur Gleis 2 Einfluss auf die Ermüdung im Bauteil.

Durch die Berechnung mit dem Lastmodell der Betriebszüge wird die Höhe des Einstufenkollektives um 37 Prozent bei eingleisiger Belastung und um 38 Prozent bei zweigleisiger Belastung verringert. Für die Lebensdauer hat dies eine Verlängerung von etwa 310 Prozent zur Folge.

Die horizontalen Kräfte der Betriebszüge wirken an diesem Bauteil den vertikalen Kräften entgegen und verringern so die Spannung. Dies bewirkt eine Reduktion des Spannungsniveaus im Vergleich zum Lastmodell 71 um jeweils 50 Prozent bei eingleisiger und zweigleisiger Überfahrt. Die Lebensdauer kann dadurch um 700 Prozent gesteigert werden.

Eine Einflusslinienberechnung hat auch hier keine Auswirkungen, da die Einflusslänge aus der Norm bereits der wahren einen Einflusslänge entspricht.

5.1.5 Pfosten H4

Beim der Berechnung des Pfostens H4 könnte die Überfahrt auf Gleis 2 vernachlässigt werden, da die daraus resultierenden Spannungen zu gering sind um berücksichtigt zu werden und wieder nur die Belastung auf Gleis 1 ins Einstufenkollektiv einfließt.

Der Vergleich der beiden Lastmodelle bezüglich der vertikalen Belastung bringt eine Verminderung des Spannungsniveaus beim Lastmodell der Betriebszüge um jeweils 25 Prozent bei eingleisiger und zweigleisiger Überfahrt. Die Lebensdauer würde sich dadurch um etwa 140 Prozent verlängern.

Beim Vergleich der beiden Lastmodelle mit Berücksichtigung der horizontalen Belastung stimmen die Ergebnisse nahezu genau überein. Der Vergleichsfaktor beträgt hier 0,98, also eine Reduktion von zwei Prozent. Die Gesamtlebensdauer würde dadurch um fünf Prozent erhöht werden.

Die Einflusslinienberechnung ergab, dass alleine durch diese Maßnahme, eine Reduktion des Spannungsniveaus um 12 Prozent möglich wäre. Liegt die Brücke im Bogen würde diese Maßnahme allerdings auf der unsicheren Seite liegen, da die Ergebnisse laut dem Lastmodell der Betriebszüge eine um 12 Prozent höhere Spannung aufweisen.

5.1.6 Pfosten H5

Ähnlich der Ergebnisse des Pfostens H4 muss an diesem Bauteil ebenfalls nur ein Gleis berücksichtigt werden, hier ist es Gleis 2.

Auch bezüglich der Vertikalbelastungen ergeben sich dieselben Ergebnisse, also Reduktoinen der Spannungen um 25 bzw. 26 Prozent und eine Erhöhung der Lebensdauer um 140 Prozent.

Auf Horizontalbelastungen reagiert H5 jedoch ganz anders. Da der Punkt auf der Bogeninnenseite liegt, reduziert sich die Spannung durch die Horizontalkräfte Dies hat im Vergleich zum Lastmodell 71 Spannungsreduktionen von jeweils 37 Prozent zur Folge, was eine Erhöhung der Lebensdauer um 300 Prozent bedeutet.

Die Einflusslinienberechnung ergab beim Pfosten H5 ebenfalls eine Entlastung um 12 Prozent und durch die günstige Wirkung der Horizontalkraft ist sie auch in diesem Vergleich auf der sicheren Seite.

5.1.7 Querträger Q_{ges}

An diesem Bauteil wirkt hauptsächlich Gleis 1, jedoch hat auch Gleis 2 einen geringen Einfluss.

Durch die Änderung der Berechnungsmethode könnte an diesem Punkt die Höhe des Einstufenkollektives um neun Prozent bei eingleisigem Betrieb und um zehn Prozent bei zweigleisiger Belastung verringert werden. Dies hätte bei der Berechnung der Lebensdauer Auswirkungen von etwa 35 Prozent.

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln erwähnt, ist die Horizontaleinwirkung beim Querträger etwas speziell, da sie je nach belastetem Gleis unterschiedlich wirkt. Bei reiner Belastung auf Gleis 1 wird die Spannung aus der Vertikalbelastung durch die Horizontalkraft stark verringert. Bei Belastung von beiden Gleisen wird die Spannung zwar ebenfalls verringert, aber bei weitem nicht so stark, da die Horizontalkraft auf Gleis 2 ungünstige Auswirkungen hat und deshalb den Einfluss des Gleises stark erhöht. Am Ende stehen trotzdem Reduktionen der Spannungen von 34 bzw. 24 Prozent, was sich bei der Lebensdauer mit einer Verlängerung von 250 bzw. 130 Prozent bemerkbar macht.

Die Einflusslinienberechnung bewirkt am Querträger ebenfalls eine Reduktion der Spannungen um 12 Prozent. Dadurch beträgt der Unterschied der beiden Lastmodelle nur noch drei Prozent, jedoch liegt das einfache Lastmodell 71 leicht auf der unsicheren Seite.

5.1.8 Längsträger L_{ges}

Der Längsträger L_{ges} liegt direkt unter der Außenschiene von Gleis 2, weshalb auch nur dieses Einfluss auf die Ermüdungsberechnung hat.

Die Spannungen aus den Vertikalkräften können durch die Berechnung mit dem Lastmodell der Betriebszüge um 12 bzw. 13 Prozent gesenkt werden, wodurch eine Verlängerung der Lebensdauer um 50 Prozent möglich ist.

Die Horizontalkraft hat in diesem Punkt katastrophale Auswirkungen. Weil die Außenschiene genau auf dem Bauteil aufliegt und die Horizontalkraft genau auf diese drückt erhöht sich das Einstufenkollektiv um 89 bzw. 88 Prozent. Aufgrund dessen wird die Lebensdauer um 85 Prozent reduziert.

Durch eine Einflusslinienberechnung kann das Einstufenkollektiv des Lastmodells 71 um elf Prozent reduziert werden. Dadurch würden die Ergebnisse der beiden Lastmodelle bis auf zwei Prozent, mit dem Lastmodell 71 auf der sicheren Seite, zusammenpassen.

5.1.9 Diagonalstab D1

Bei der Diagonale D1 hat Gleis 2 nur sehr geringen Einfluss und das Einstufenkollektiv resultiert hauptsächlich aus den Belastungen auf Gleis 1.

Die durch die vertikale Belastung hervorgerufenen Spannungen im Bauteil können im Vergleich mit dem Lastmodell 71 um jeweils zehn Prozent gesenkt werden. Aufgrund dessen erhöht sich die Lebensdauer um 38 Prozent.

Berücksichtigt man auch die Horizontalkräfte sind die Spannungen aus dem Lastmodell der Betriebszüge um zwei Prozent höher als die des Lastmodells 71. Dies würde die Lebensdauer geringfügig um etwa 5 Prozent verkürzen.

Die Einflusslinienberechnung bringt in diesem Bauteil keine Verbesserung, da die wahre Einflusslänge wieder mit der aus der Norm übereinstimmt.

5.1.10 Diagonalstab D2

Die Ergebnisse bei der Diagonalen D2 sind denen von D1 sehr ähnlich, allerdings wirkt hier beinahe nur Gleis 2.

Das Spannungsniveau durch die vertikalen Kräfte kann hier um jeweils um 12 Prozent reduziert werden, wodurch sich die Lebensdauer um etwa 46 Prozent erhöht.

Die horizontalen Kräfte entlasten dieses Bauteil wodurch sich eine Verringerung der Spannung um 24 Prozent und eine Verlängerung der Gesamtlebensdauer von 125 Prozent ergibt.

Eine Einflusslinienberechnung bringt auch hier keine Verbesserungen.

5.1.11 Diagonalstab D3

Bei der Diagonalen D3 wirkt wieder beinahe nur die Überfahrt auf Gleis 1 als Ermüdungslast.

Das Spannungsniveau kann durch die Berechnung mit dem Lastmodell der Betriebszüge im Vergleich zu Lastmodell 71 um 11 Prozent bei eingleisiger Belastung und um 12 Prozent bei zweigleisiger Beanspruchung verringert werden. Dies hat eine Verlängerung der Lebensdauer um etwa 40 Prozent zur Folge.

Die durch die Horizontalbelastung erhöhte Spannung passt bis auf ein Prozent mit der des Lastmodells 71 zusammen, wodurch sich auch die Lebensdauer beinahe nicht ändert.

Die Einflusslinienberechnung ergibt an diesem Bauteil eine Vergrößerung der Einflusslänge, wodurch die Spannungen des Lastmodells 71 um sechs Prozent verringert werden können. Liegt die Brücke im Bogen hat dies allerdings Berechnungen auf der unsicheren Seite zur Folge.

5.1.12 Diagonalstab D4

Bei der Diagonalen D4 hat Gleis 1 nur sehr geringen Einfluss auf die Ermüdungslasten, da Gleis 2 das nähergelegene Gleis ist.

Das Spannungskollektiv kann auch hier um elf Prozent reduziert werden und die Lebensdauer um 40 Prozent erhöht werden.

Da die Zentrifugalkräfte die Spannungen in diesem Punkt wieder verringern ergibt sich hier durch die Berechnungen mit dem Lastmodell der Betriebszüge eine Reduktion der Höhe des Einstufenkollektives von jeweils 20 Prozent und eine Erhöhung der Lebensdauer um 95 Prozent.

Die Einflusslinienberechnung bewirkt auch hier ausschließlich Verbesserung, da die Spannung um sechs Prozent verringert werden kann und aufgrund der günstigen Horizontalkraft keine unsicheren Berechnungen entstehen.

5.2. *Fazit*

Aus den durchgeführten Untersuchungen zeigt sich, dass durch eine Berechnung mit dem Lastmodell der Betriebszüge das Spannungsniveau aus den vertikalen Lasten um mindestens zehn Prozent bei jedem Bauteil gesenkt werden kann. Auf den ersten Blick bewirkt dies keine große Verbesserung, allerdings haben diese zehn Prozent auf die Lebensdauerberechnung große Auswirkungen. So wird die Lebensdauer bei einer Spannungsverringering um zehn Prozent um 35 Prozent erhöht. Dies entspricht außerdem der Gesamtlebensdauer, wodurch die Auswirkungen auf Berechnungen der Restlebensdauer noch größer sind.

Die dargestellten Ergebnisse, bei denen nur die vertikale Last berücksichtigt wurde, können auch 1:1 auf eine gerade Brücke umgelegt werden. Da Brücken überwiegend auf geraden Teilstücken einer Strecke ausgeführt sind, ist es umso wichtiger zu wissen, dass die Berechnungen des in der Praxis üblichen Lastmodells 71 bezüglich der Vertikalbelastung sehr konservativ sind. Auf diese Weise könnte man die Lebensdauer älterer Brücken erhöhen und würde eine Sanierung bzw. einen Neubau und somit hohe Kosten zumindest hinauszögern oder teilweise sogar vermeiden.

Anders sehen die Ergebnisse bei Berücksichtigung der Fliehkräfte aus, sind doch hier die Spannungen der Einstufenkollektive durch das Lastmodell 71 überwiegend zu niedrig angesetzt. Ist eine Brücke im Bogen gebaut oder geplant, sollten die horizontalen Einwirkungen unbedingt berücksichtigt werden, da die Spannungen teilweise sehr stark erhöht werden und eine frühzeitige Sanierung droht. Außerdem könnte dann auch die günstige Wirkung der Horizontalkraft auf der Bogeninnenseite berücksichtigt werden.

Bei Brücken auf geraden Teilstücken einer Strecke ist außerdem eine Einflusslinienberechnung zu empfehlen, wenn die Berechnung mit dem Lastmodell der Betriebszüge zu aufwendig erscheint. Bei einigen Punkten des Tragwerks kann man alleine durch diese Methode die rechnerische Lebensdauer der Bauteile um bis zu zwölf Prozent erhöhen. Bei Brücken im Bogen ist von dieser Methode eindeutig abzuraten, da sich die Höhe der Einstufenkollektive noch weiter verringert, obwohl diese teilweise ohnehin bereits zu niedrig angesetzt sind.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] UNTERWEGER, H., *Berücksichtigung der Betriebsbeanspruchung beim Ermüdungsnachweis von stählernen Eisenbahnbrücken*, Institutsveröffentlichung des Lehrstuhl für Stahlbau und Flächentragwerke, TU Graz, Heft 7 – 1996 (Publikation der gleichlautenden Dissertation).
- [2] ÖNORM EN 1991-2, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke: Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken. Wien: Österreichisches Normeninstitut, 01.08.2004
- [3] Univ. Prof. DI Dr. Harald Unterweger, *Stahlbau Skriptum zur Lehrveranstaltung „Stahlbau“*. Graz: Institut für Stahlbau, TU Graz, 2012.
- [4] ÖNORM EN 1993-2, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten: Teil 2: Stahlbrücke. Wien: Österreichisches Normeninstitut, 01.11.2005

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2.1: Auf- und Grundriss der Kugelsteinbrücke	9
Abb. 2.2: 3D-Vollmodell der Kugelsteinbrücke	10
Abb. 2.3: 3D-Stabmodell der Kugelsteinbrücke	10
Abb. 2.4: Lasteinleitung in die Schwellenträger unter Berücksichtigung des Lastangriffspunktes und Überhöhung	11
Abb. 2.5: Punkte der Voruntersuchung	12
Abb. 2.6: Punkte für die Auswertung der Berechnungsergebnisse	13
Abb. 2.7: Querschnitte der untersuchten Punkte	13
Abb. 3.1: Normenlastenzug ^[2]	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abb. 3.2: Betriebszug Typ 2 Lokgezogener Reisezug ^[2]	16
Abb. 3.3: Verkehrszusammenstellung Regelverkehr mit Achslast $\leq 22,5 \text{ t}$ ^[2]	18
Abb. 4.1: Einflusslinie für Untergurt U1/U2; unten: Aufstellung Normenlastenzug für σ_{\max} im Untergurt	22
Abb. 4.2: Einflusslinie für Untergurt U6; unten: Aufstellung Normenlastenzug für σ_{\max} im Untergurt	23
Abb. 4.3: Einflusslinie für Pfosten H4; unten: Aufstellung Normenlastenzug für σ_{\max} und σ_{\min} im Pfosten;	24
Abb. 4.4: Einflusslinie für Längsträger L_{ges} ; unten: Aufstellung Normenlastenzug für σ_{\max} und σ_{\min} im Längsträger	26
Abb. 4.5: Einflusslinie für Querträger Q_{ges} ; unten: Aufstellung Normenlastenzug für σ_{\max} und σ_{\min} im Querträger	29
Abb. 4.6: Einflusslinie für Diagonale D1; unten: Aufstellung Normenlastenzug für σ_{\max} und σ_{\min} in der Diagonalen	30
Abb. 4.7: Einflusslinie für Diagonale D3; unten: Aufstellung Normenlastenzug für σ_{\max} und σ_{\min} in der Diagonalen	32
Abb. 4.8: Darstellung der "Überfahrt des Betriebszuges" Typ 3 (LF 1057)	35
Abb. 4.9: Typ 3, Seitenansicht der Vertikalbelastung LF 1057	35
Abb. 4.10: Typ 3, Draufsicht der Vertikalbelastung LF 1057	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abb. 4.11: Typ 3, zugehörige Horizontallasten LF 2057	35
Abb. 4.12: Typ 2, Lokgezogener Reisezug ^[2]	36
Abb. 4.13: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund der Normalkraft im Untergurt U1/U2	37
Abb. 4.14: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund der Normalkraft im Untergurt U3	38
Abb. 4.15: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund der Normalkraft im Untergurt U6	38
Abb. 4.16: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft am Untergurt U7	39
Abb. 4.17: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Pfosten H4	39
Abb. 4.18: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Pfosten H5	40
Abb. 4.19: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund Moment und Normalkraft im Längsträger L_{ges}	41
Abb. 4.20: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund Moment im Querträger Q_{ges}	41
Abb. 4.21: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D1	42
Abb. 4.22: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D2	42
Abb. 4.23: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D3	43

Abb. 4.24: Typ 2, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D4	43
Abb. 4.25: Typ 3, Hochgeschwindigkeitsreisezug ^[2]	44
Abb. 4.26: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund der Normalkraft im Untergurt U1/U2	45
Abb. 4.27: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund der Normalkraft im Untergurt U3	46
Abb. 4.28: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund der Normalkraft im Untergurt U6	46
Abb. 4.29: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft am Untergurt U7	47
Abb. 4.30: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Pfosten H4	47
Abb. 4.31: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Pfosten H5	48
Abb. 4.32: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund Moment und Normalkraft im Längsträger L_{ges}	48
Abb. 4.33: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund Moment im Querträger Q_{ges}	49
Abb. 4.34: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D1	50
Abb. 4.35: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D2	50
Abb. 4.36: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D3	51
Abb. 4.37: Typ 3, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D4	51
Abb. 4.38: Typ 5, Lokgezogener Güterzug ^[2]	52
Abb. 4.39: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund der Normalkraft im Untergurt U1/U2	53
Abb. 4.40: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund der Normalkraft im Untergurt U3	53
Abb. 4.41: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund der Normalkraft im Untergurt U6	54
Abb. 4.42: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft am Untergurt U7	54
Abb. 4.43: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Pfosten H4	55
Abb. 4.44: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Pfosten H5	55
Abb. 4.45: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund Moment und Normalkraft im Längsträger L_{ges}	56
Abb. 4.46: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund Moment im Querträger Q_{ges}	56
Abb. 4.47: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D1	57
Abb. 4.48: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D2	57
Abb. 4.49: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D3	58
Abb. 4.50: Typ 5, Spannungsverlauf aufgrund Normalkraft im Diagonalstab D4	58
Abb. 4.51: Spannungskollektive für Untergurt U1/U2	65
Abb. 4.52: Spannungskollektive für Untergurt U3	65
Abb. 4.53: Spannungskollektive für Untergurt U6	65
Abb. 4.54: Spannungskollektive für Untergurt U7	66
Abb. 4.55: Spannungskollektive für Pfosten H4	66
Abb. 4.56: Spannungskollektive für Pfosten H5	66
Abb. 4.57: Spannungskollektive für Längsträger L_{ges}	67
Abb. 4.58: Spannungskollektive für Querträger Q_{ges}	67
Abb. 4.59: Spannungskollektive für Diagonale D1	67
Abb. 4.60: Spannungskollektive für Diagonale D2	68
Abb. 4.61: Spannungskollektive für Diagonale D3	68
Abb. 4.62: Spannungskollektive für Diagonale D4	68
Abb. 4.63: Normierte Ermüdungsfestigkeitslinien und Berechnungsformeln ^[3]	70

TABELLENVERZEICHNIS

<i>Tabelle 4.1: Ausgelesene maximale und minimale Schnittkräfte</i>	59
<i>Tabelle 4.2: Berechnung von Φ_2 und λ_1</i>	60
<i>Tabelle 4.3: Berechnung der Spannungskollektive Lastmodell 71</i>	61
<i>Tabelle 4.4: Berechnung der Spannungskollektive Lastmodell 71 (Fortsetzung)</i>	62
<i>Tabelle 4.5: Berechnung Φ_{BZ} für Lastenzug Typ 2</i>	63
<i>Tabelle 5.1: Darstellung der Berechnungsergebnisse (1/4)</i>	72
<i>Tabelle 5.2: Darstellung der Berechnungsergebnisse (2/4)</i>	73
<i>Tabelle 5.3: Darstellung der Berechnungsergebnisse (3/4)</i>	74
<i>Tabelle 5.4: Darstellung der Berechnungsergebnisse (4/4)</i>	75

Anhang A. Automatisierte Lastaufstellung für Lastmodell 71

Wie bereits erwähnt, müssen für Lastmodell 71 günstig wirkende Lasten des Lastenzugs bereichsweise ausgenommen werden. Um die maßgebende Stellung der Volllast zu erfassen, wurde der Lastenzug über die Brücke geschoben und die Ergebnisse in eine aus der Berechnung des Lastmodells der Betriebszüge bereits vorbereitete Excel-Datei exportiert. Da für die meisten Bauteile allerdings nicht die Volllaststellung maßgebend wird, diente dies mehr der Kontrolle der manuell aufgestellten Lastfälle. Danach wurden für die Bauteile, für die eine teilweise Aufstellung der Last maßgebend wird, Lastfälle manuell erstellt. Diese feldweise Lastaufstellungen wurden zum Teil jedoch nicht maßgebend, wodurch Zweifel aufkamen, alle möglichen Lastfälle abgedeckt zu haben. Aufgrund der als starr angenommenen, aber in Wirklichkeit nachgiebigen Zwischenaufleger der Brücke konnten die Lastfälle nicht richtig aufgestellt werden.

Daher wurde nach einer Lösung gesucht, die automatisch alle möglichen Laststellungen erfasst. Dafür wurde das Zusatzmodul RSBeweg von RSTAB verwendet. Als erstes wurden die vier Einzellasten mit jeweils 250 kN mit gleichzeitig entgegenwirkender Streckenlast von 80 kN/m über die Brücke geschoben (Abb. A. 1, Abb. A. 2). Danach wurde eine Streckenlast von 80 kN/m mit einer Länge von 0,6 m über die Brücke geschoben (Abb. A. 3, Abb. A. 4). Dadurch erhielt man jeweils etwa hundert Lastfälle, in denen jede mögliche Position der vier Einzellasten und der Streckenlast auf der Brücke abgedeckt wurde.

Die Kombination der dadurch erzeugten Lastfälle war der Schlüssel zu den Ergebnissen. Es wurde eine Ergebniskombination erstellt bei der die Streckenlastfälle mit dem „und“-Operator und die Lastfälle der Einzellasten mit dem „oder“-Operator kombiniert wurden. Dadurch wurden immer alle Gleichlastabschnitte verwendet, die für den Bauteil eine ungünstige Wirkung hatten und immer nur der Lastfall der Einzellasten verwendet, der maßgebend für den gewählten Bauteil wurde. Durch die bei den Einzellasten eingegebene negative Streckenlast wird die bei den Einzellasten ebenfalls wirkende Gleichlast aufgehoben.

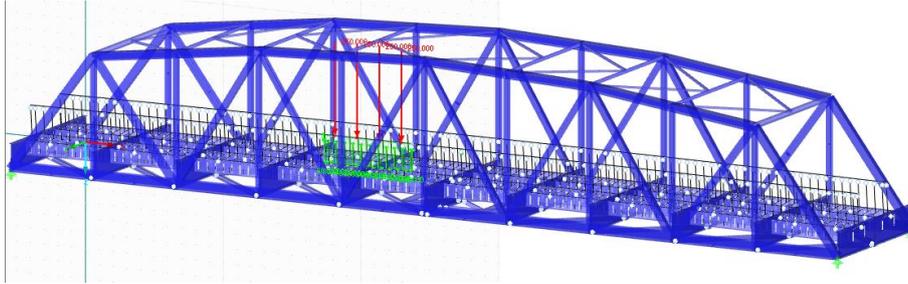


Abb. A. 1: 3D-Ansicht: Vier Einzellasten mit entgegengewirkender Streckenlast aus LM71 (LF 3046)

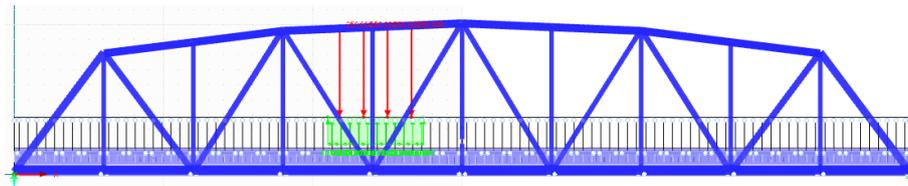


Abb. A. 2: Seitenansicht: Vier Einzellasten mit entgegengewirkender Streckenlast aus LM 71 (LF 3046)

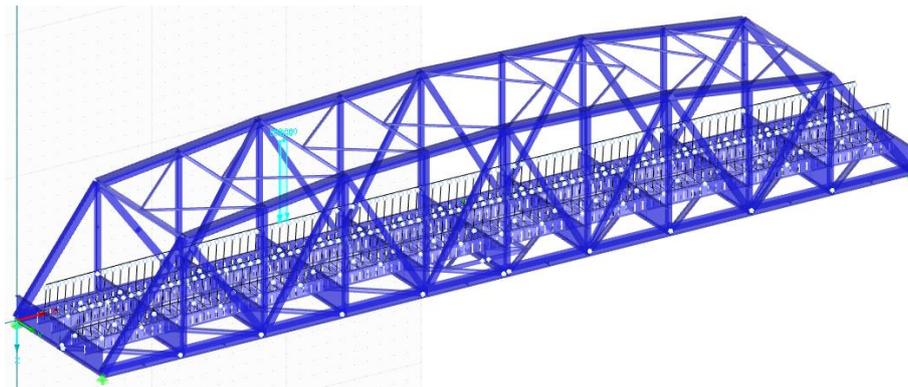


Abb. A. 3: Teilstück der Streckenlast auf Gleis 1 (LF 4031)

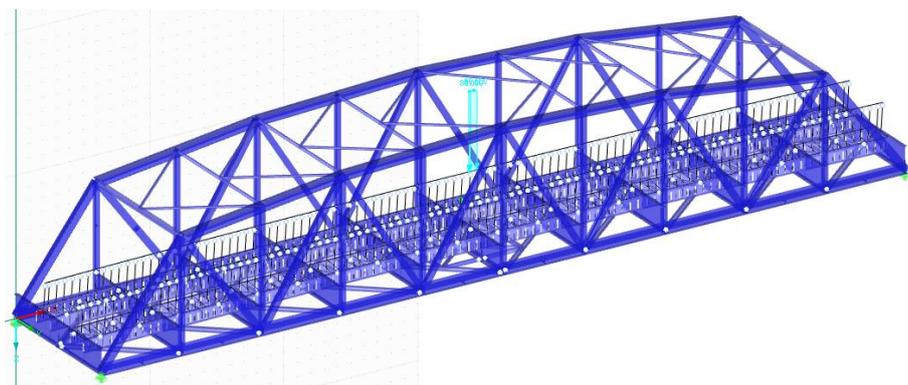


Abb. A. 4: Teilstück der Streckenlast auf Gleis 1 (LF 4055)

Anhang B. Einflusslinienberechnung

Eine direkte Einflusslinienberechnung ist mit dem Programm RSTAB nicht möglich, deshalb musste auch diese Berechnung mit RSBeweg durchgeführt werden. Hierfür wurde eine „1“-Last von 100 kN über den Lastangriffsträger geschoben (Abb. B. 1, Abb. B. 2). Die Ergebnisse der Schnittkraftberechnung wurden danach exportiert, für die gewünschten Punkte herausgefiltert und ins Excel importiert. Hierzu diente die bereits erstellte Datei für die Betriebszüge. Mit den Querschnittswerten wurden die Schnittkräfte in Spannungen umgerechnet und der erhaltene Spannungsverlauf in einem Diagramm dargestellt.

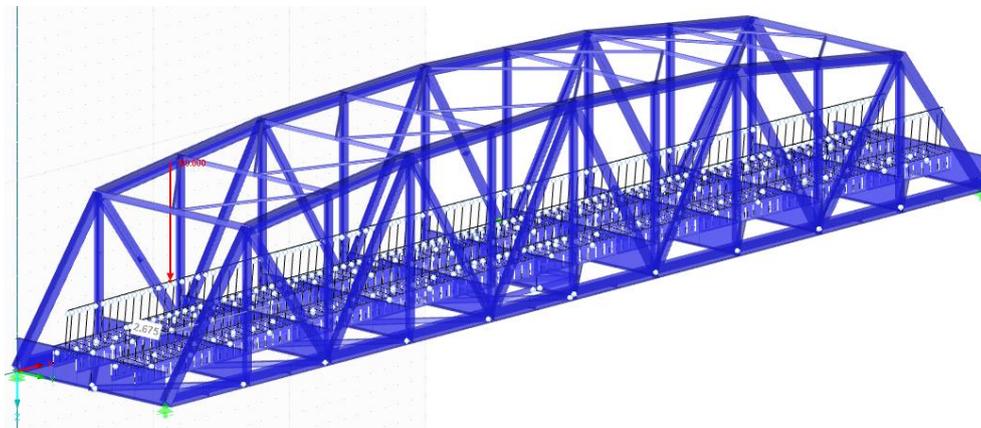


Abb. B. 1: "1"-Last von 100kN auf Gleis 1 (LF 1014)

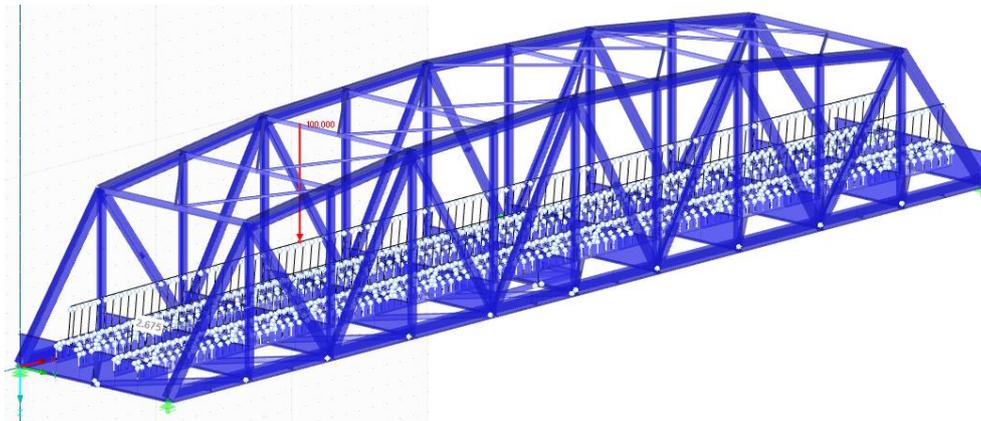
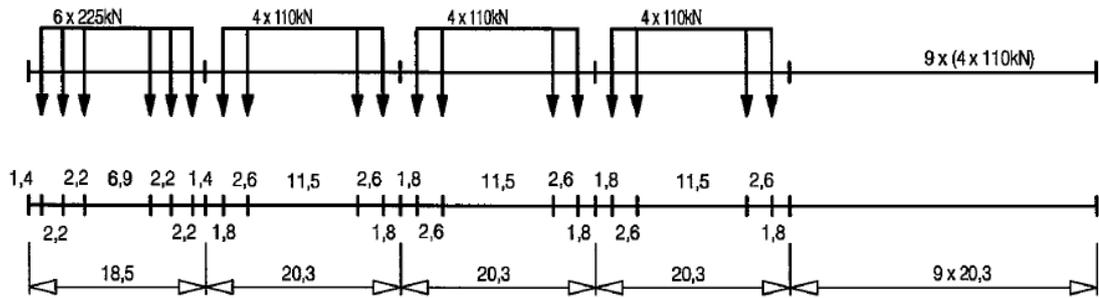


Abb. B. 2: "1"-Last von 100kN auf Gleis 1 (LF 1030)

Anhang C. Darstellung Lastenzüge

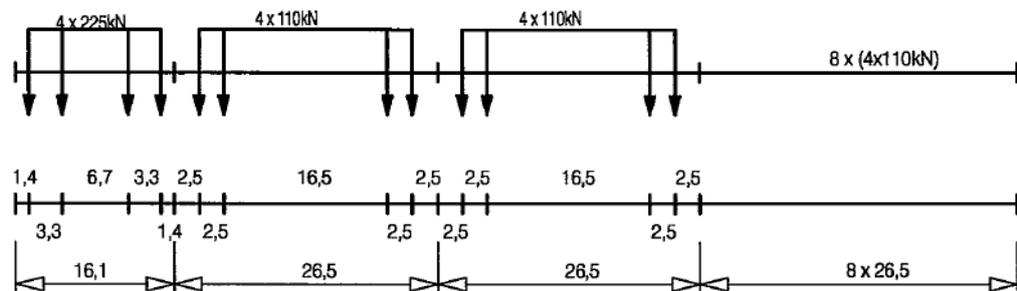
Typ 1 Lokgezogener Reisezug

$$\Sigma Q = 6630\text{kN} \quad V = 200\text{km/h} \quad L = 262,10\text{m} \quad q = 25,3\text{kN/m'}$$



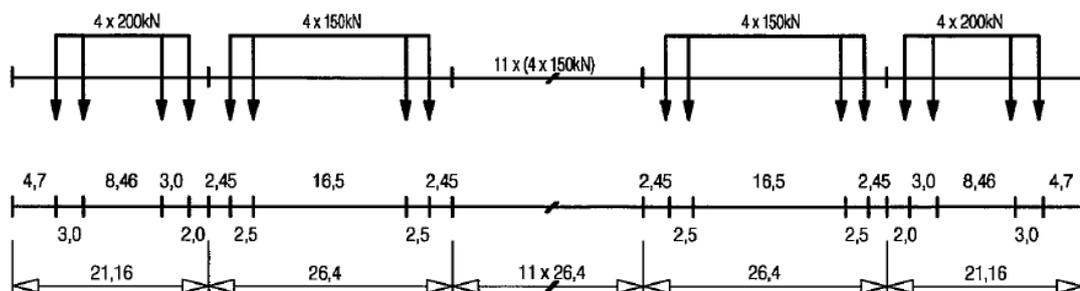
Typ 2 Lokgezogener Reisezug

$$\Sigma Q = 5300\text{kN} \quad V = 160\text{km/h} \quad L = 281,10\text{m} \quad q = 18,9\text{kN/m'}$$



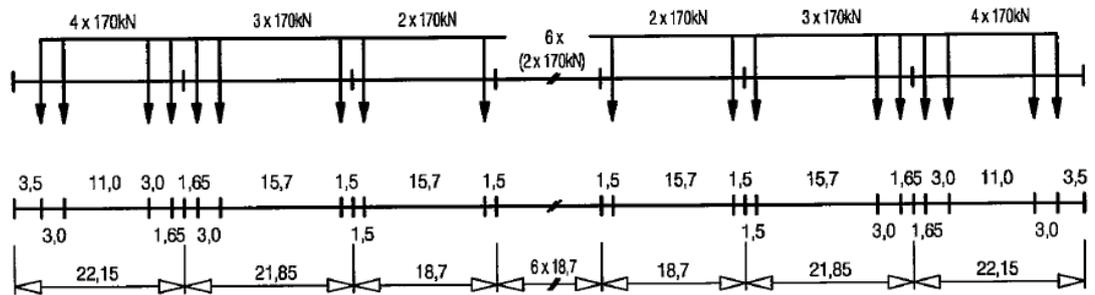
Typ 3 Hochgeschwindigkeitsreisezug

$$\Sigma Q = 9400\text{kN} \quad V = 250\text{km/h} \quad L = 385,52\text{m} \quad q = 24,4\text{kN/m'}$$



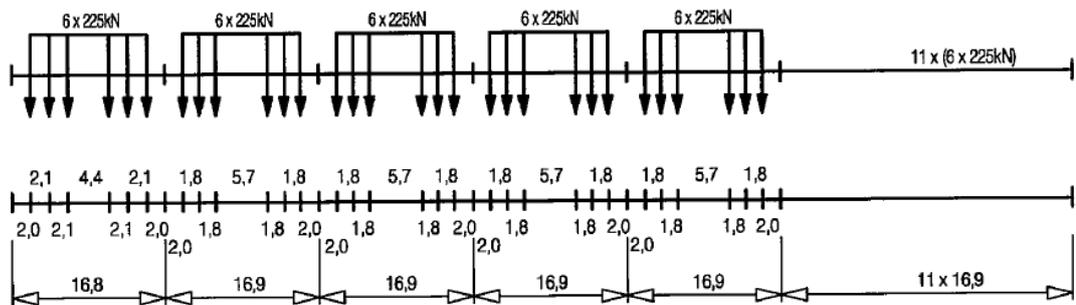
Typ 4 Hochgeschwindigkeitsreisezug

$\Sigma Q = 5100\text{kN}$ $V = 250\text{km/h}$ $L = 237,60\text{m}$ $q = 21,5\text{kN/m'}$



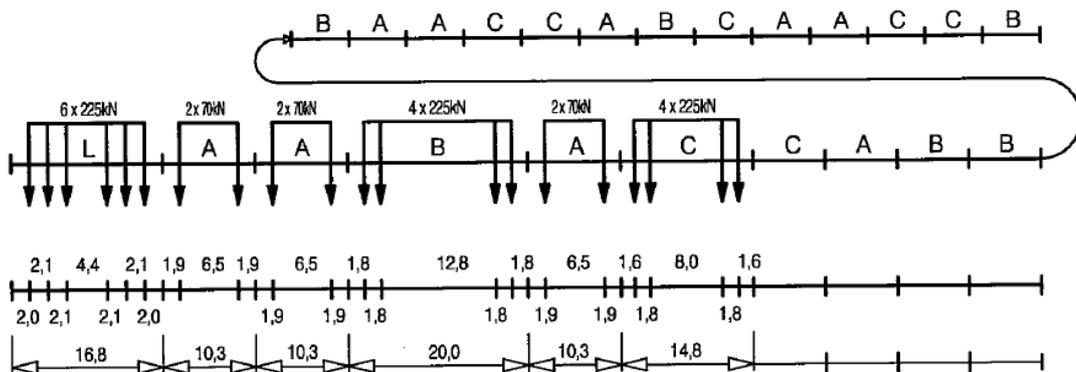
Typ 5 Lokgezogener Güterzug

$\Sigma Q = 21600\text{kN}$ $V = 80\text{km/h}$ $L = 270,30\text{m}$ $q = 80,0\text{kN/m'}$



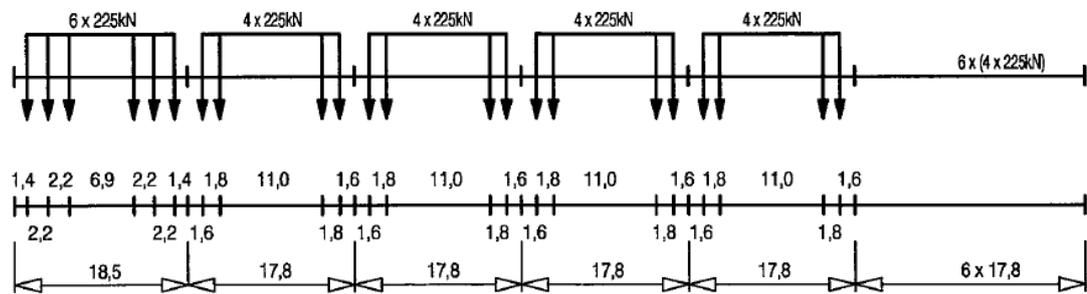
Typ 6 Lokgezogener Güterzug

$\Sigma Q = 14310\text{kN}$ $V = 100\text{km/h}$ $L = 333,10\text{m}$ $q = 43,0\text{kN/m'}$



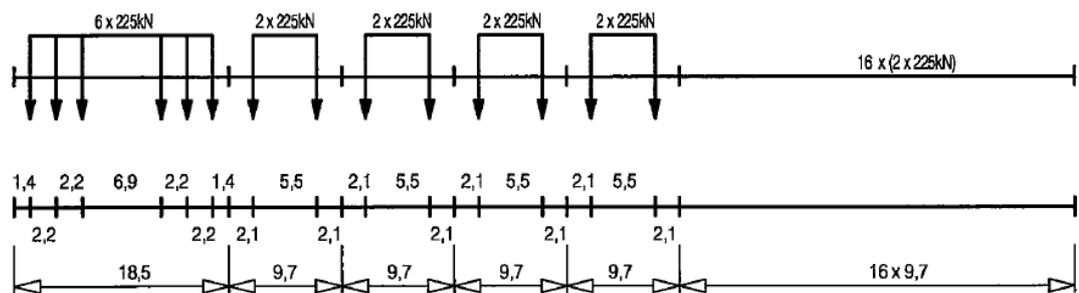
Typ 7 Lokgezogener Güterzug

$\Sigma Q = 10350\text{kN}$ $V = 120\text{km/h}$ $L = 196,50\text{m}$ $q = 52,7\text{kN/m'}$



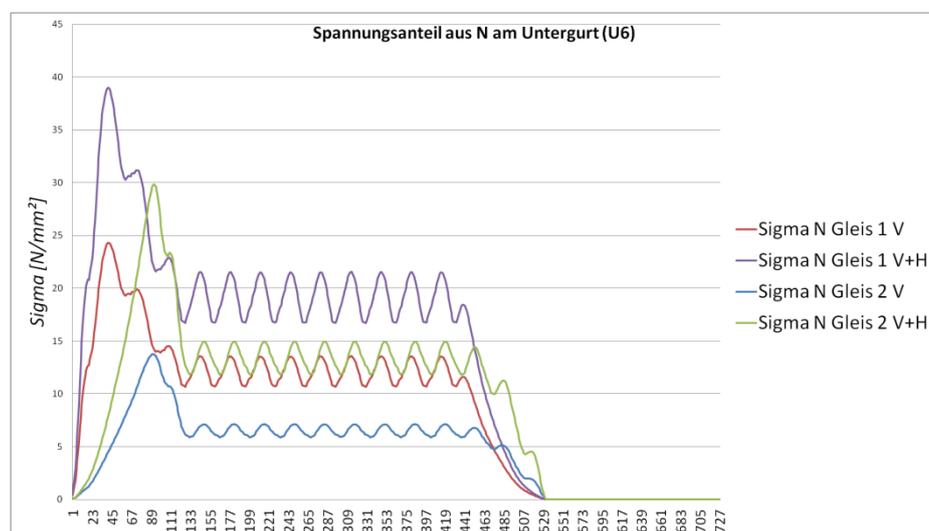
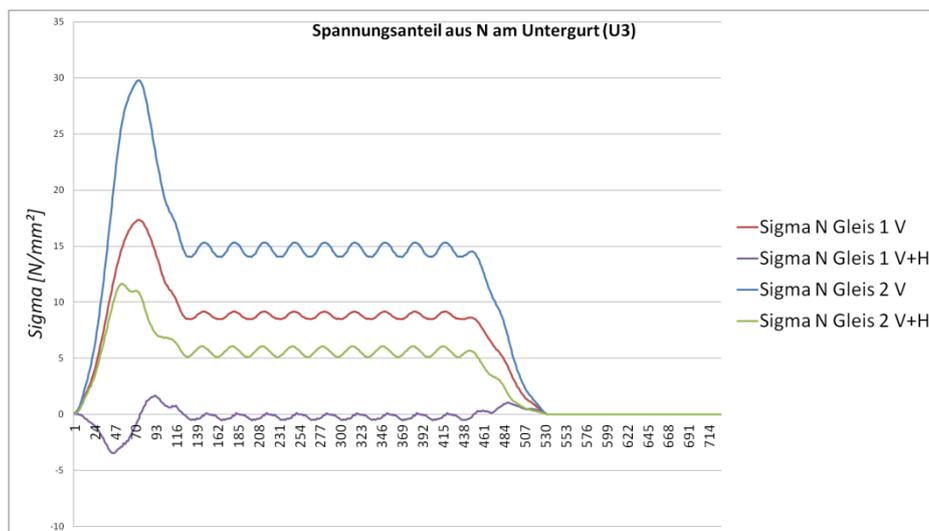
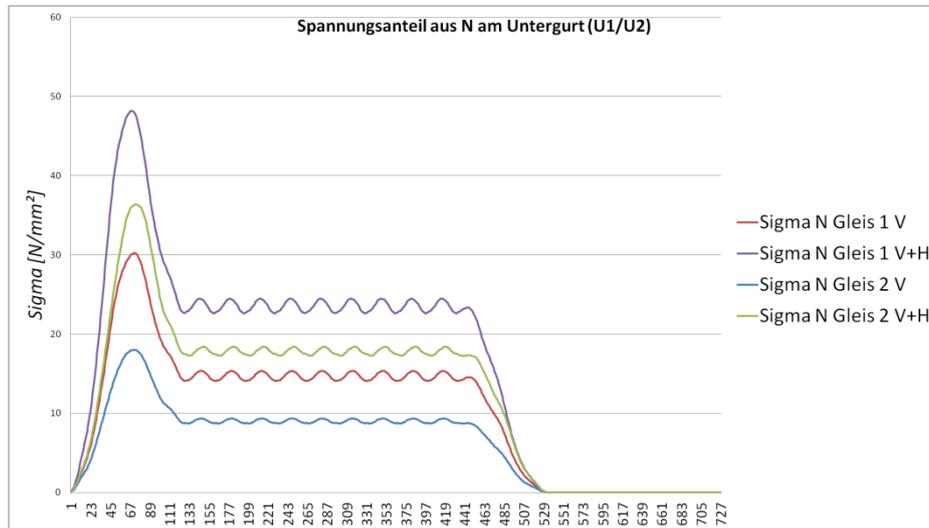
Typ 8 Lokgezogener Güterzug

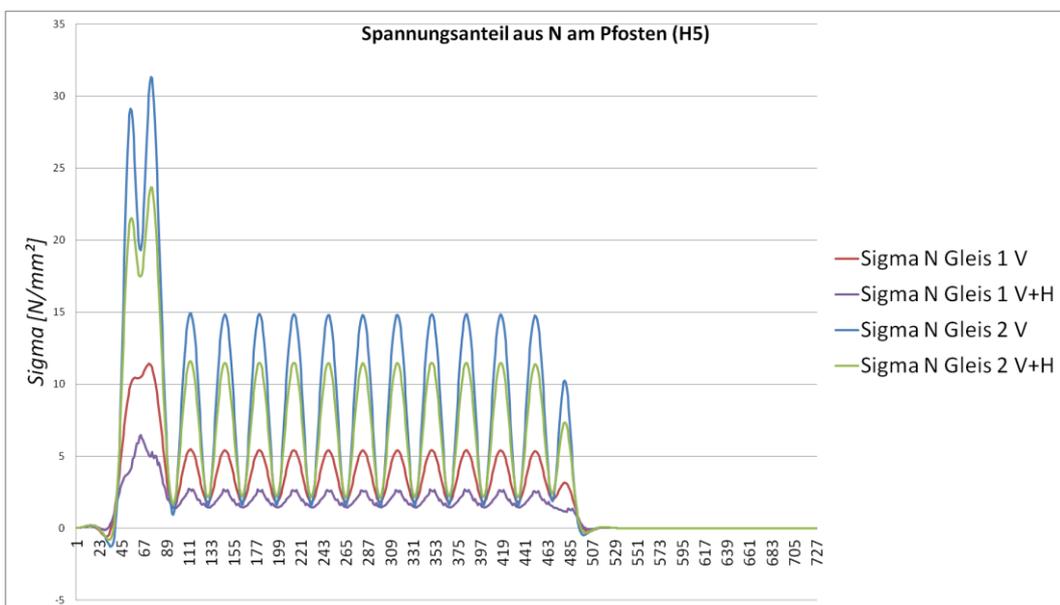
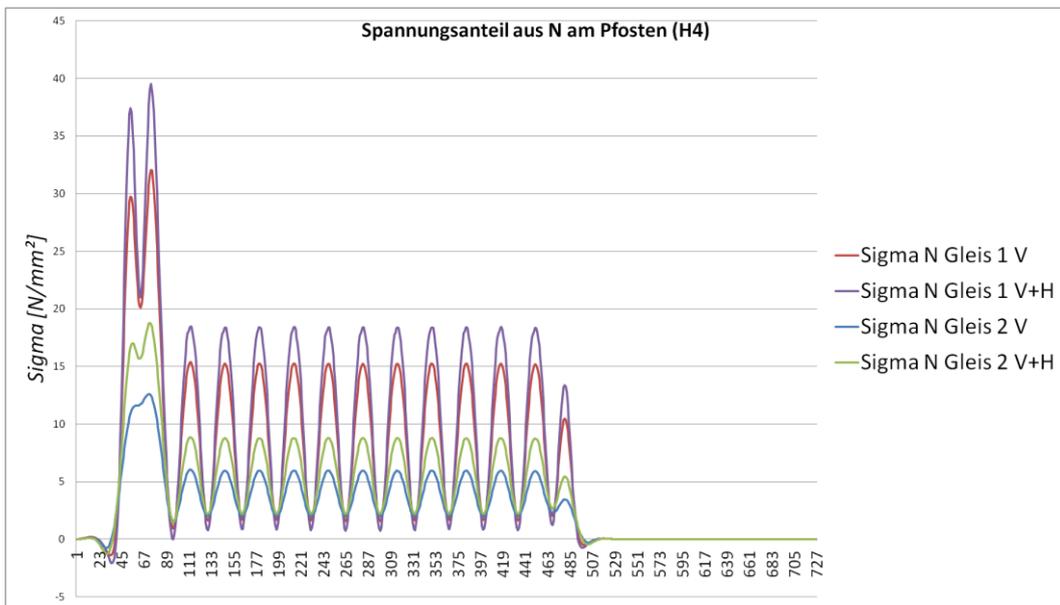
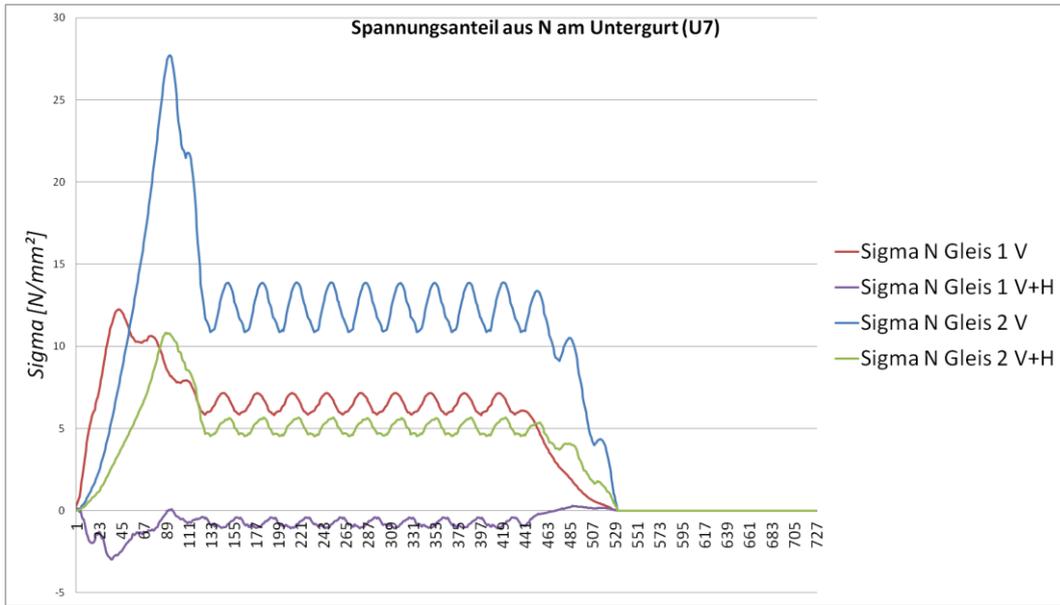
$\Sigma Q = 10350\text{kN}$ $V = 100\text{km/h}$ $L = 212,50\text{m}$ $q = 48,7\text{kN/m'}$

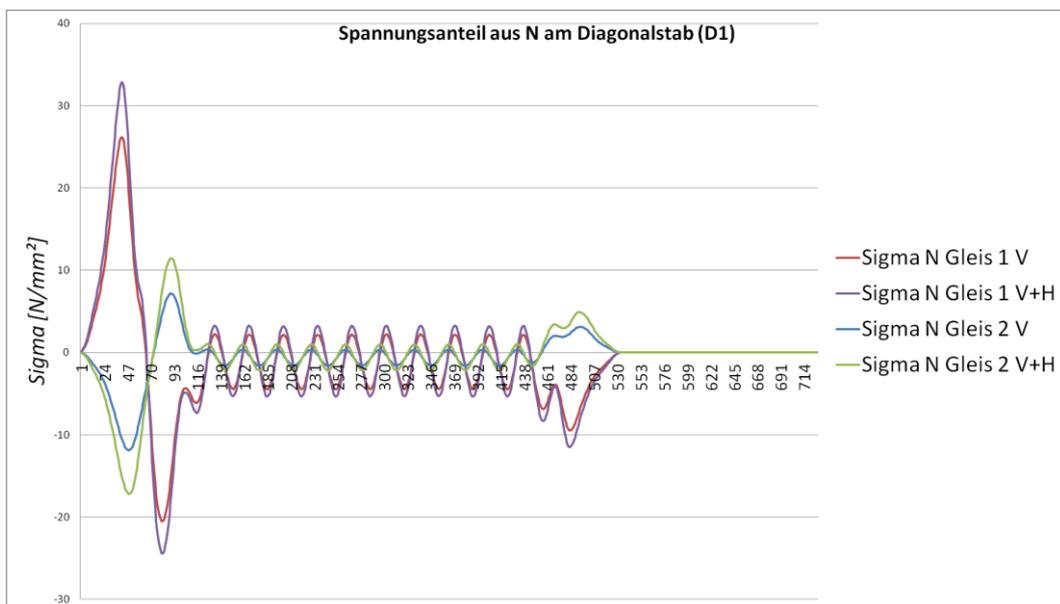
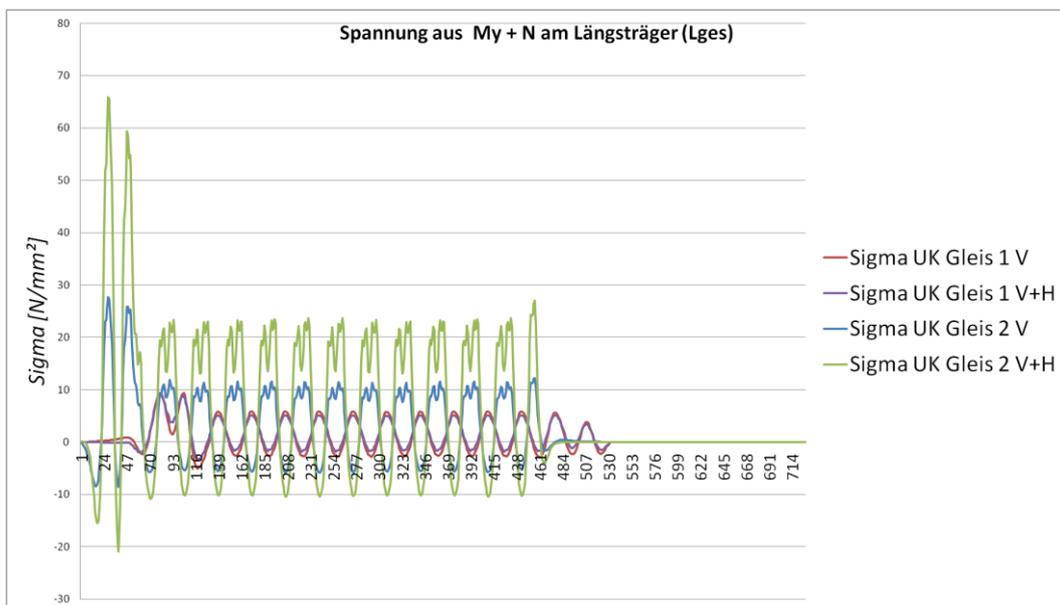
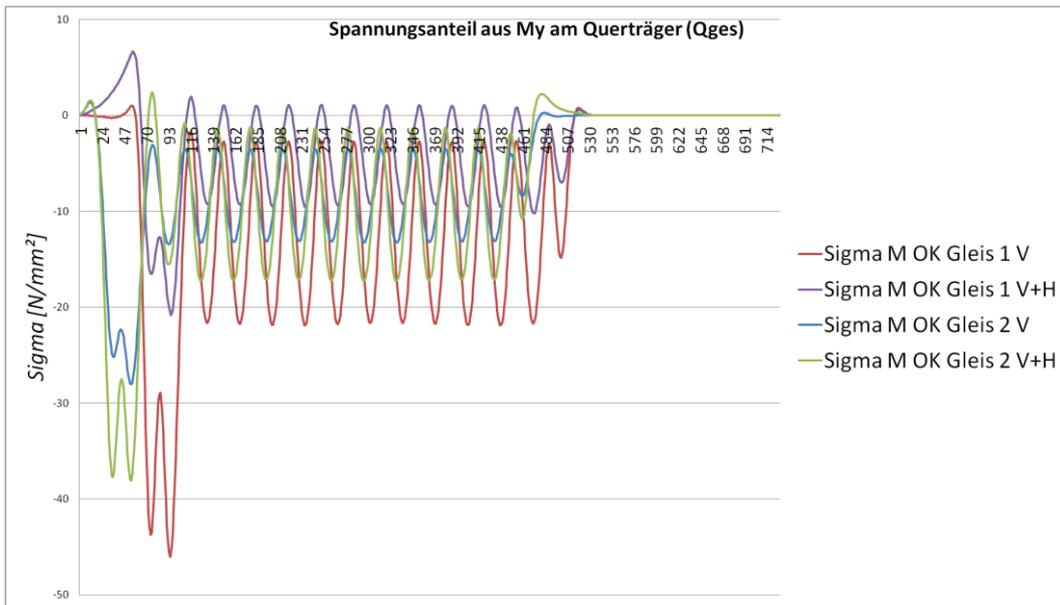


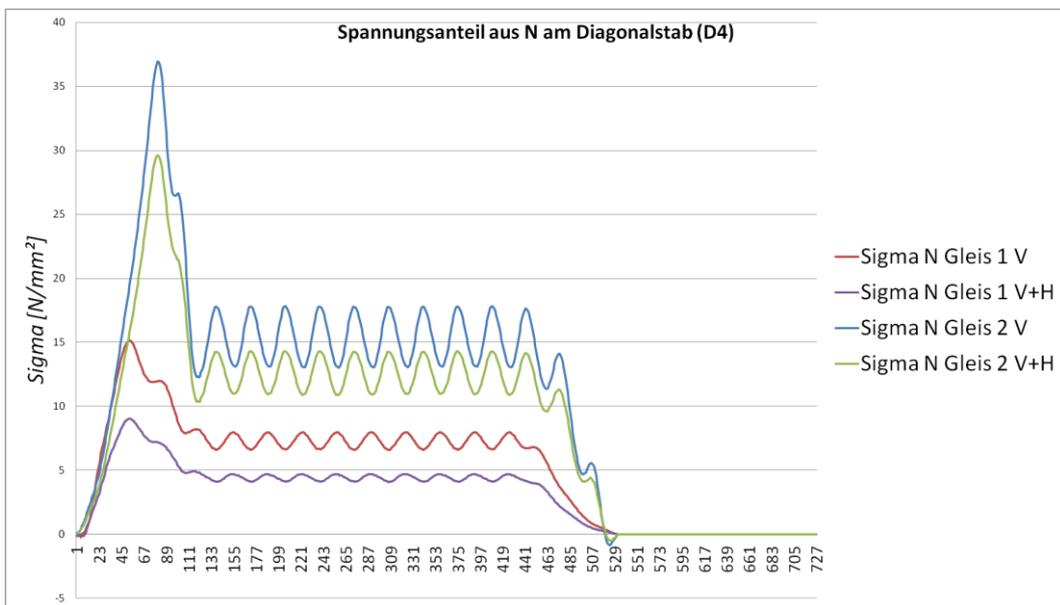
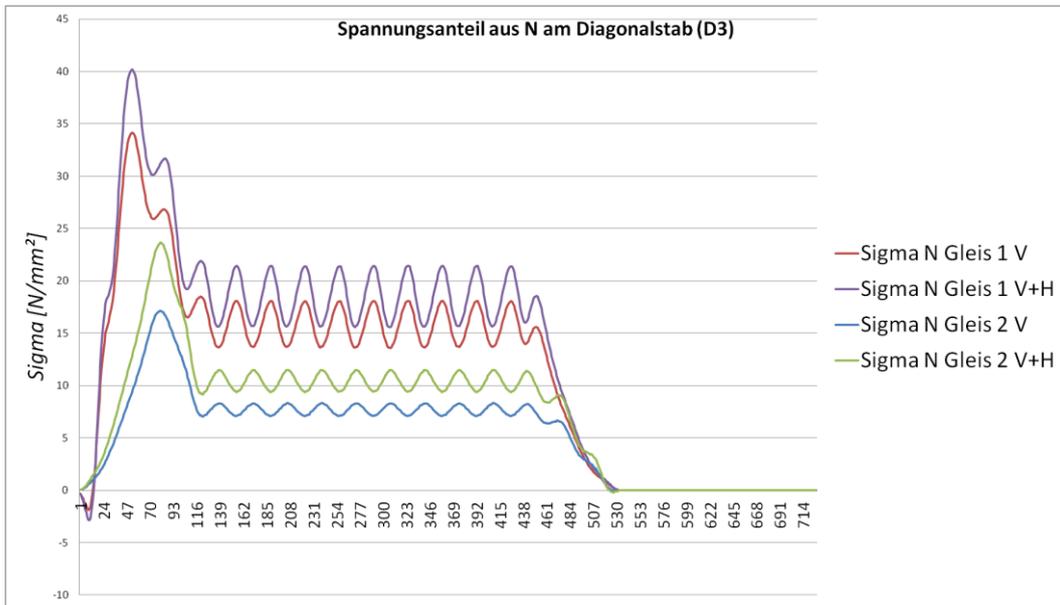
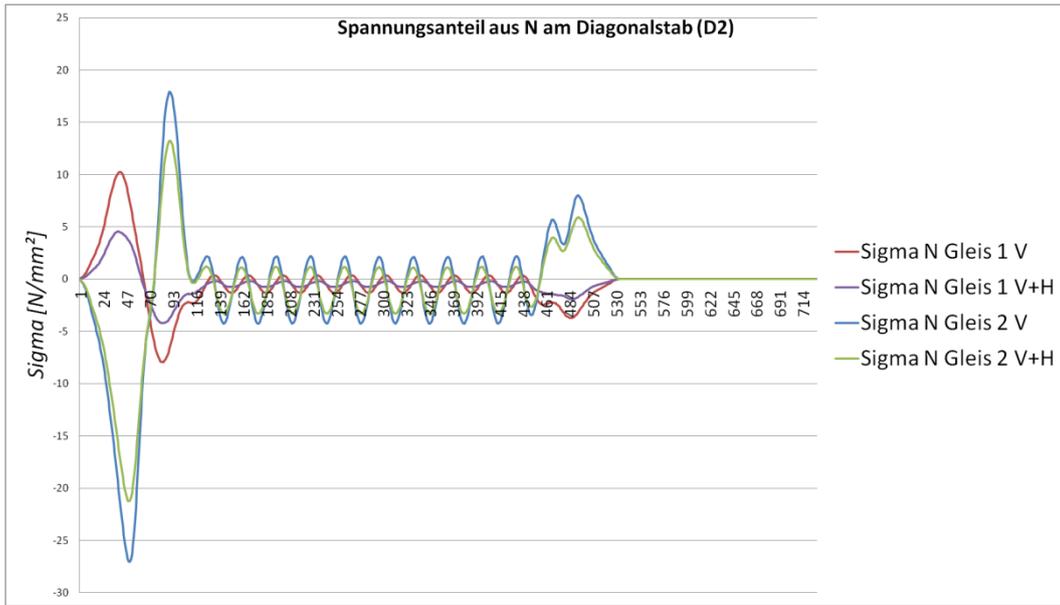
Anhang D. Spannungsverläufe der restlichen Lastenzüge

D.1. Spannungsverläufe Lastenzug Typ 1

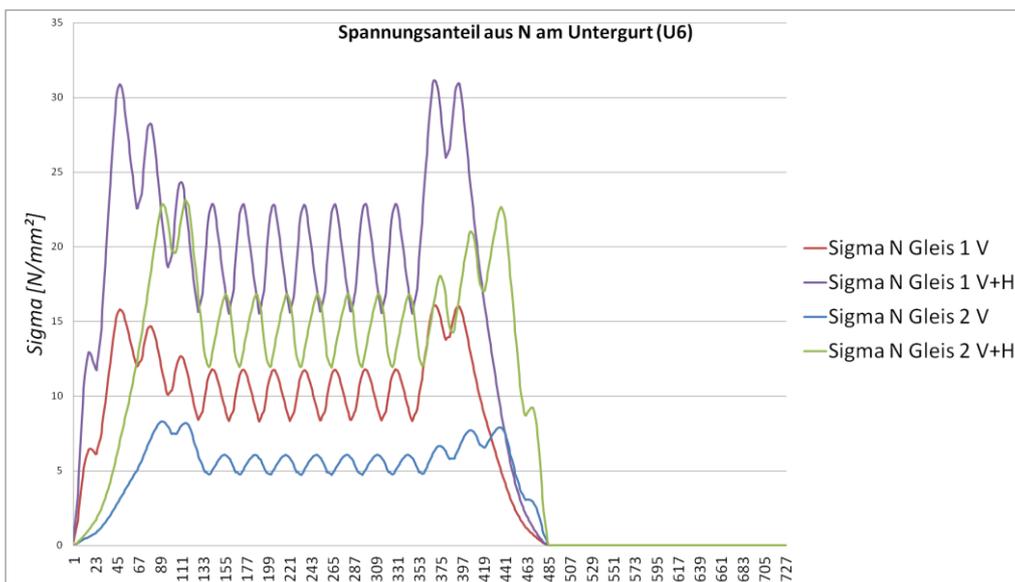
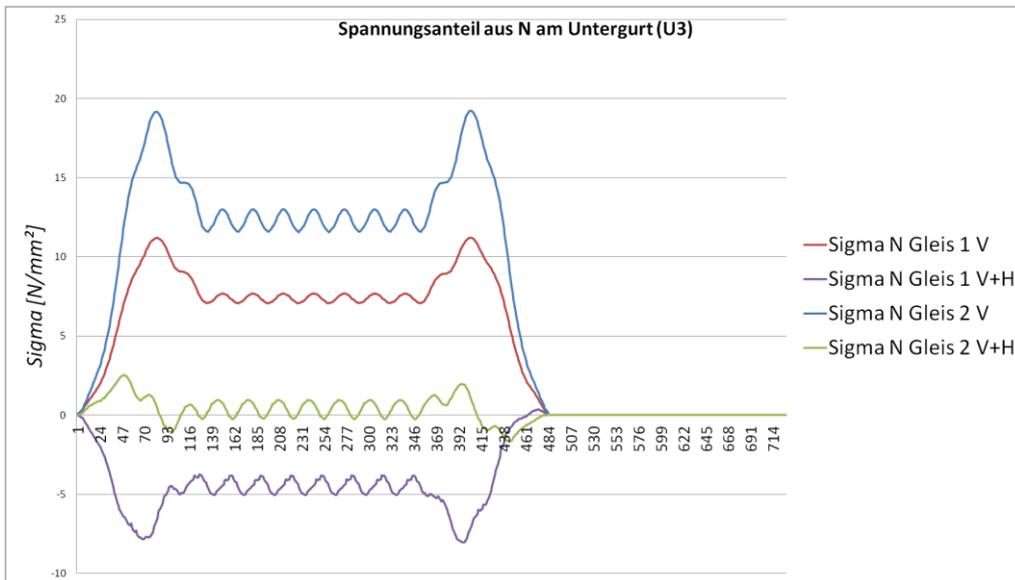
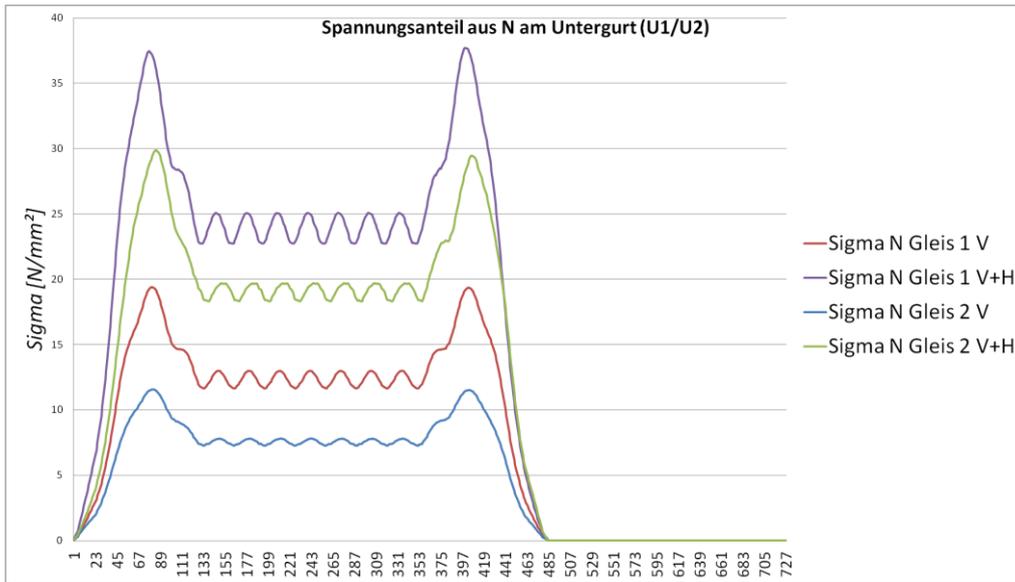


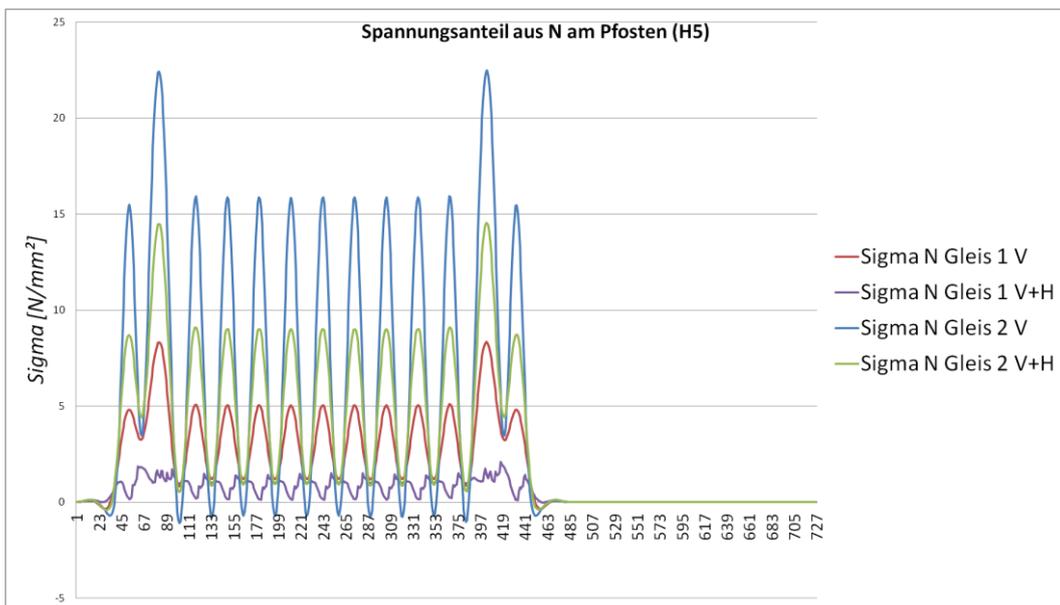
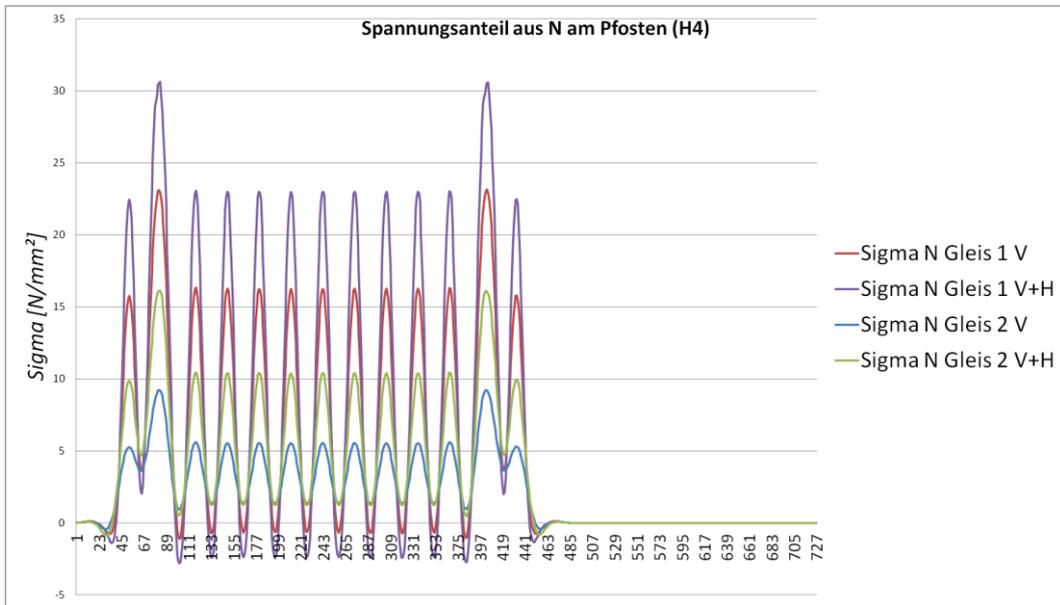
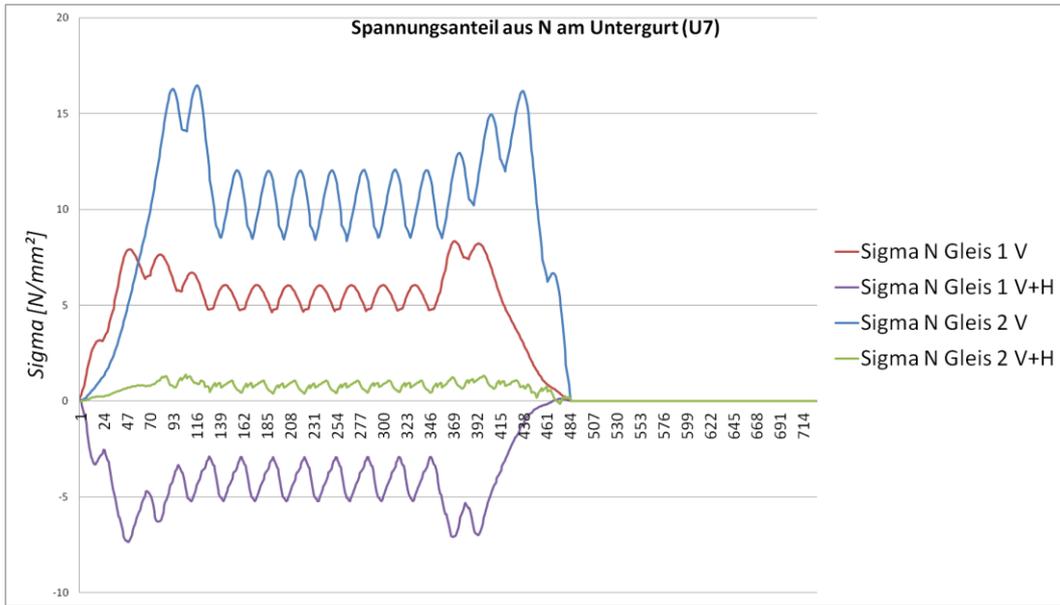


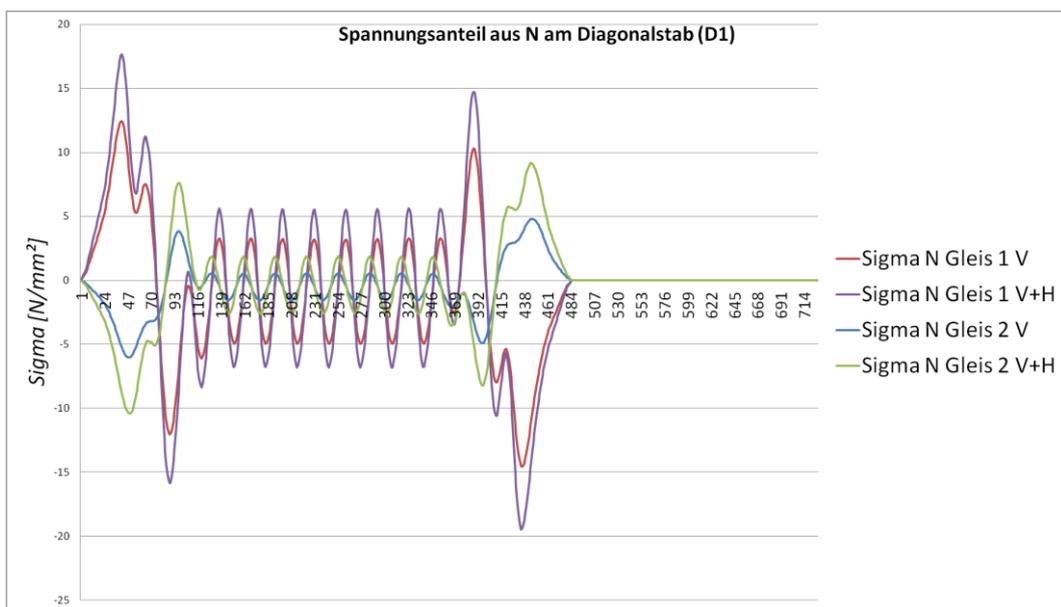
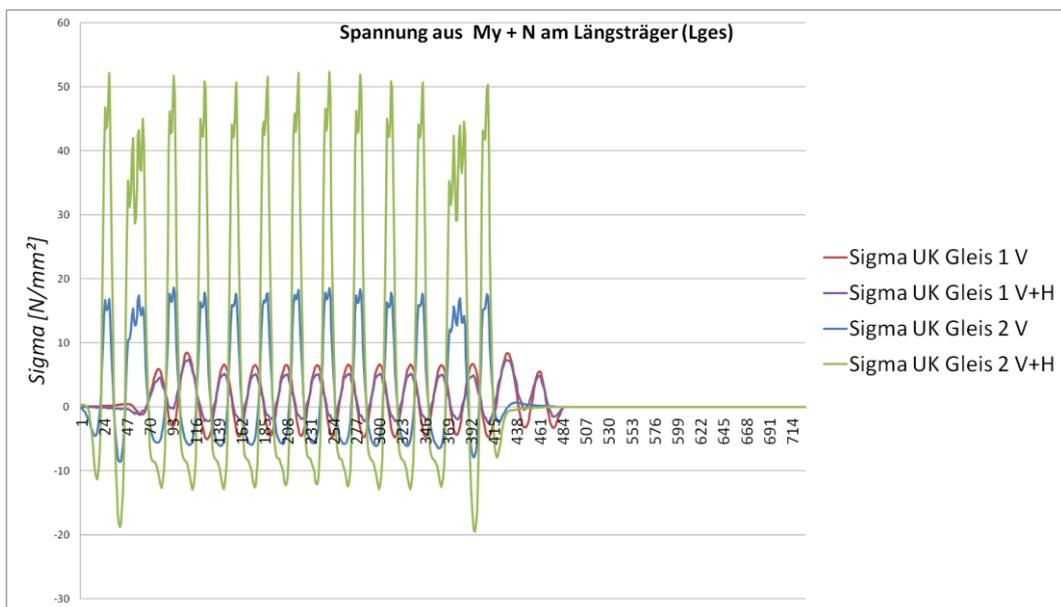
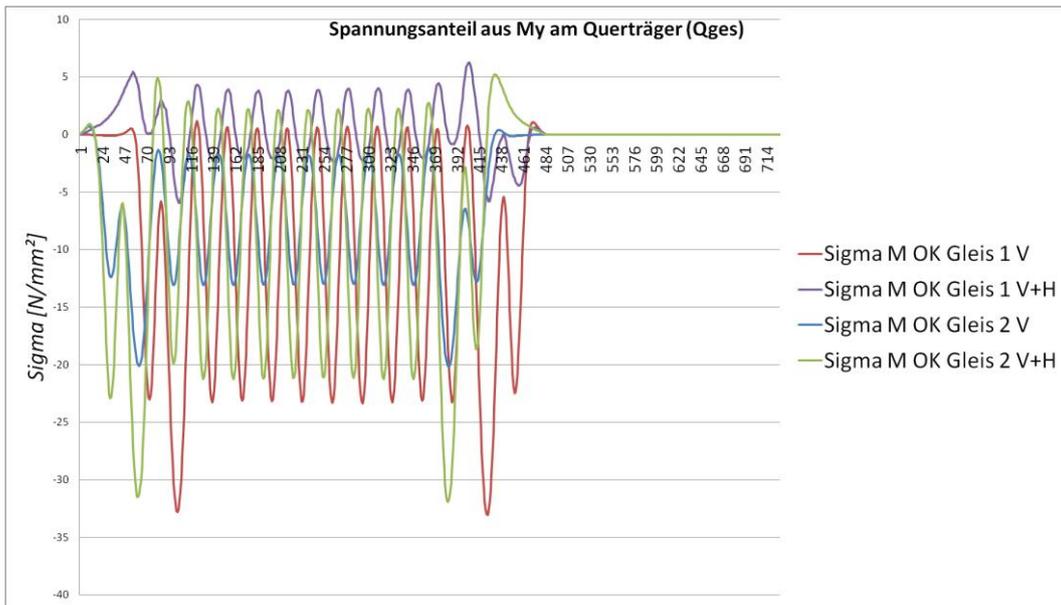


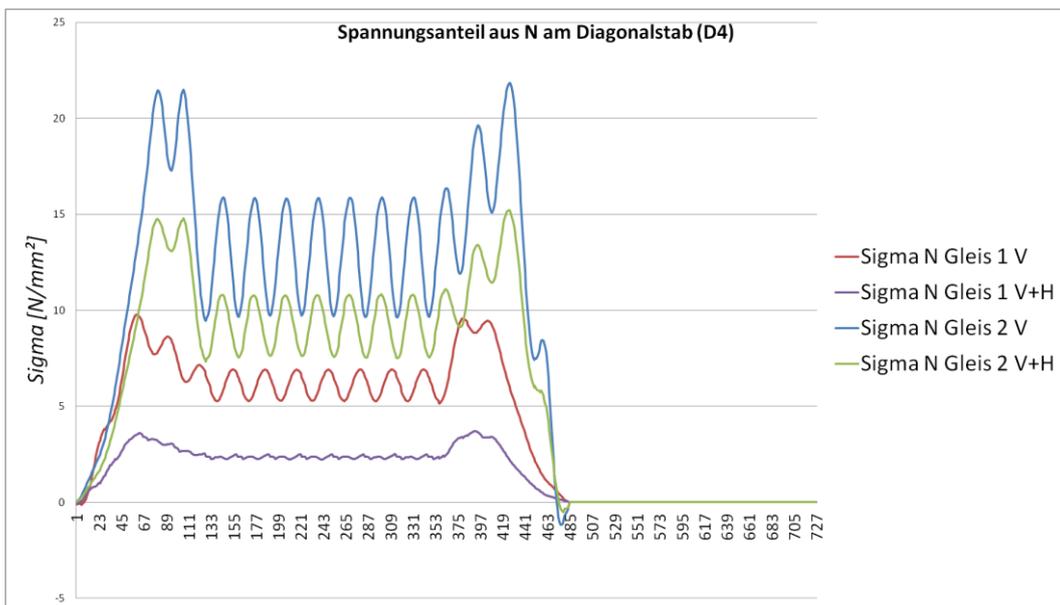
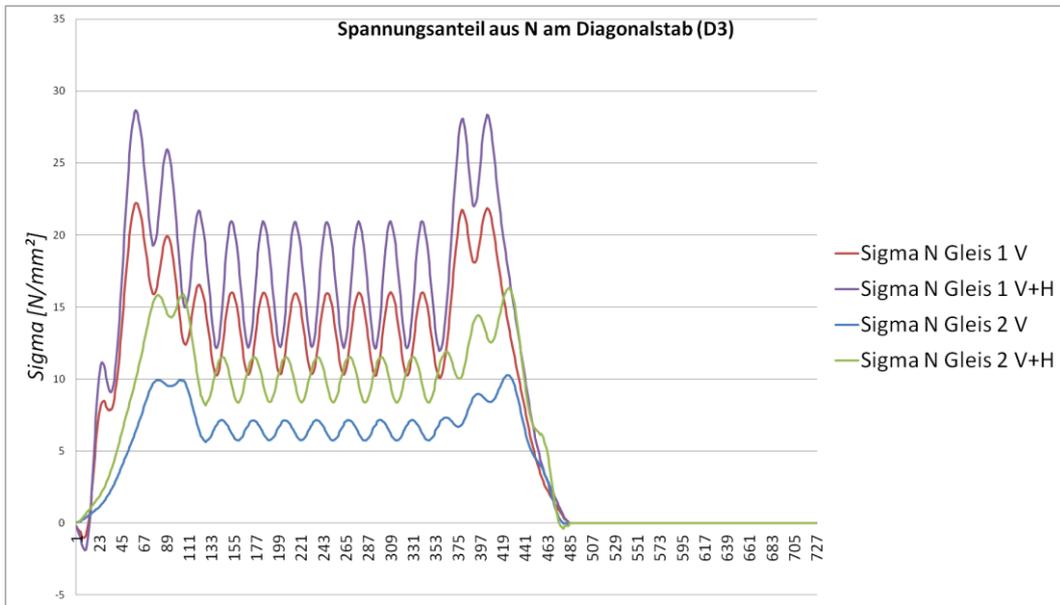
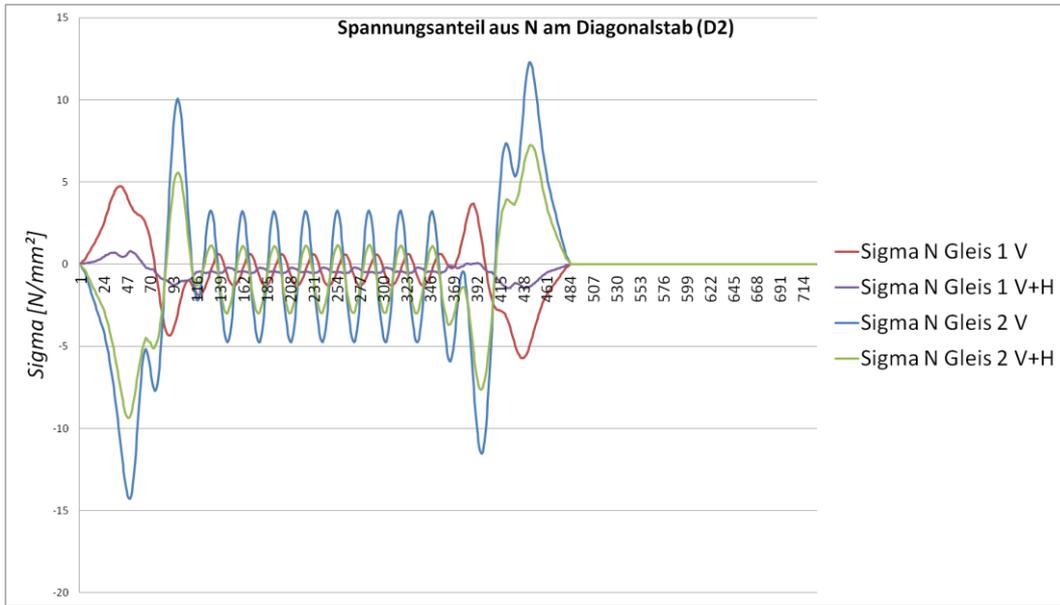


D.2. Spannungsverläufe Lastenzug Typ 4

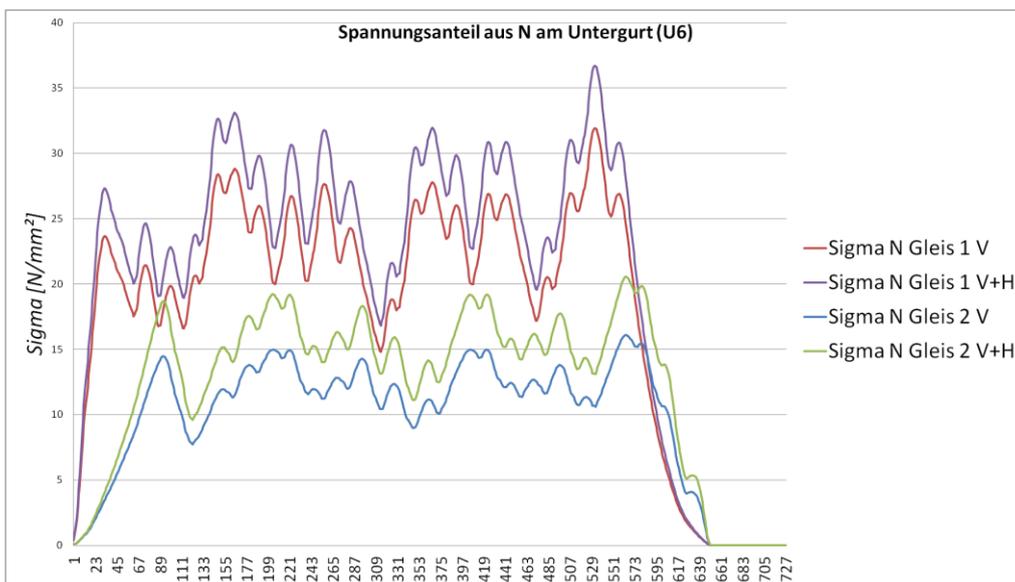
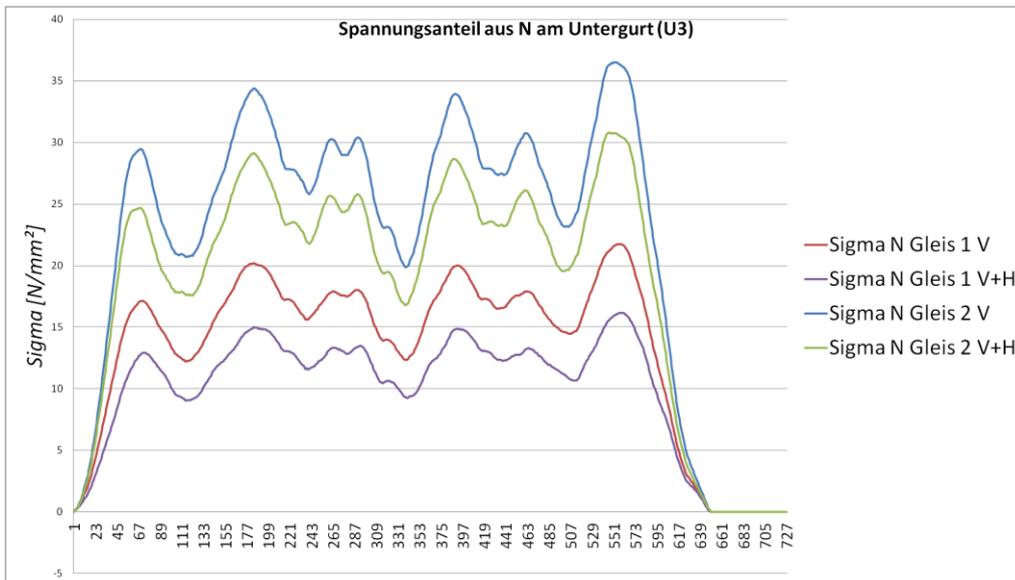
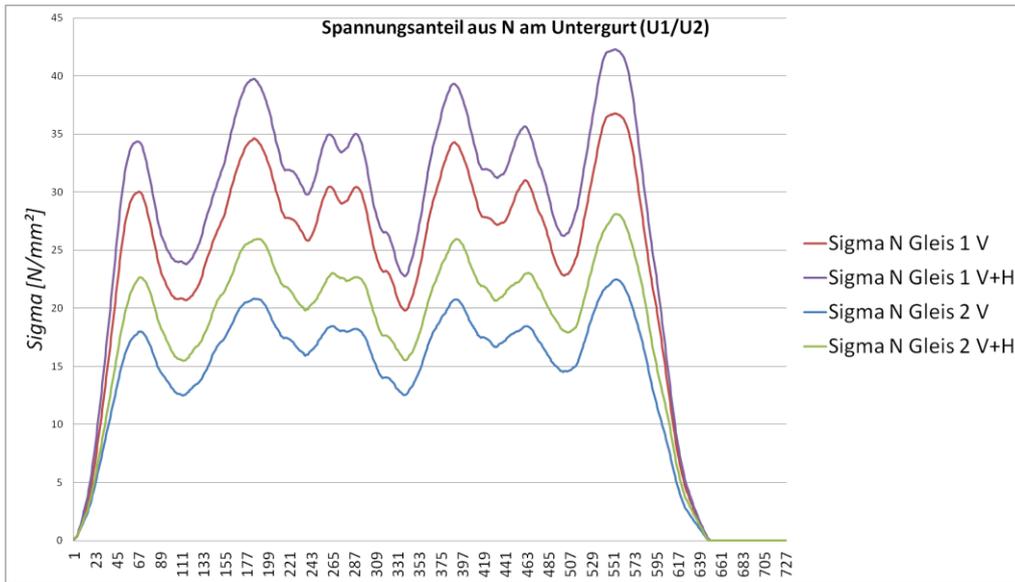


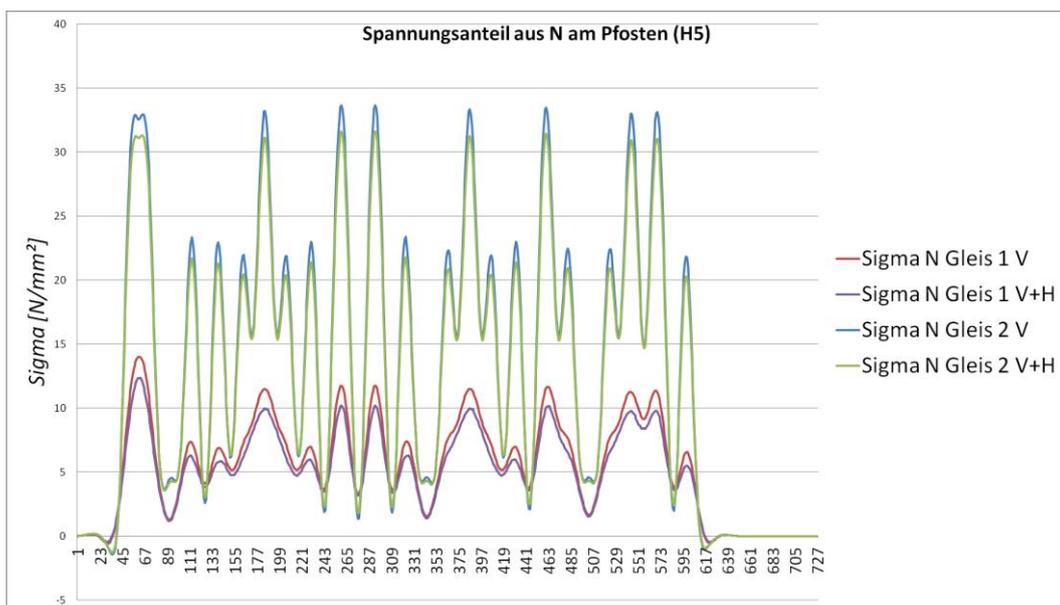
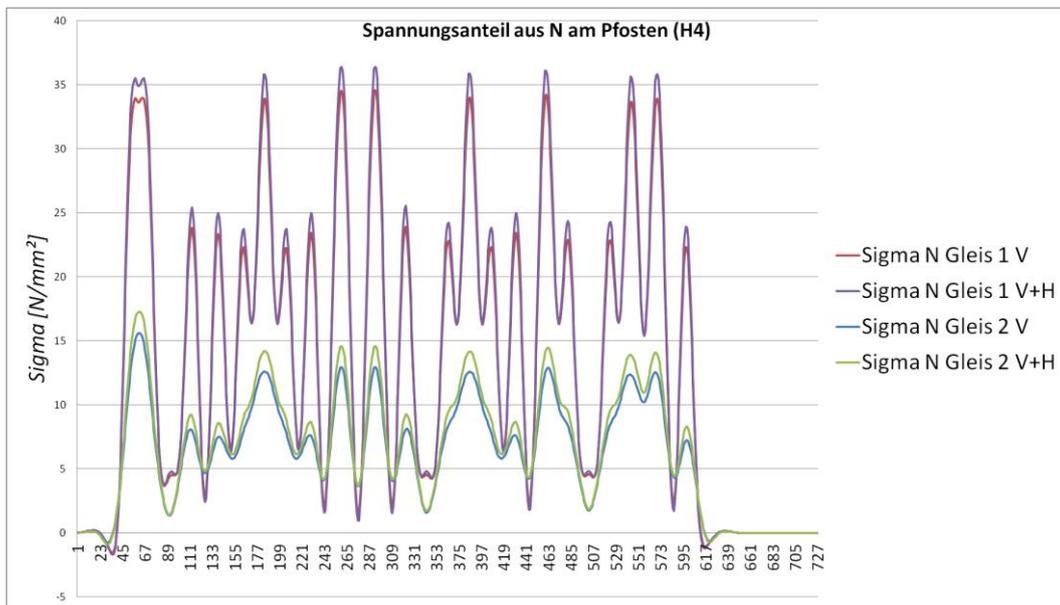
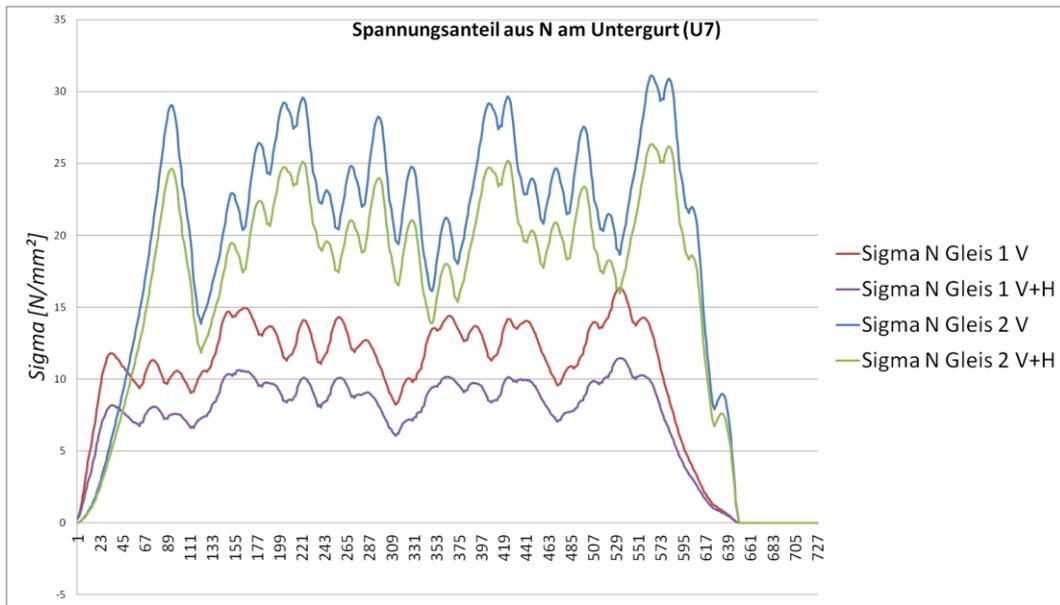


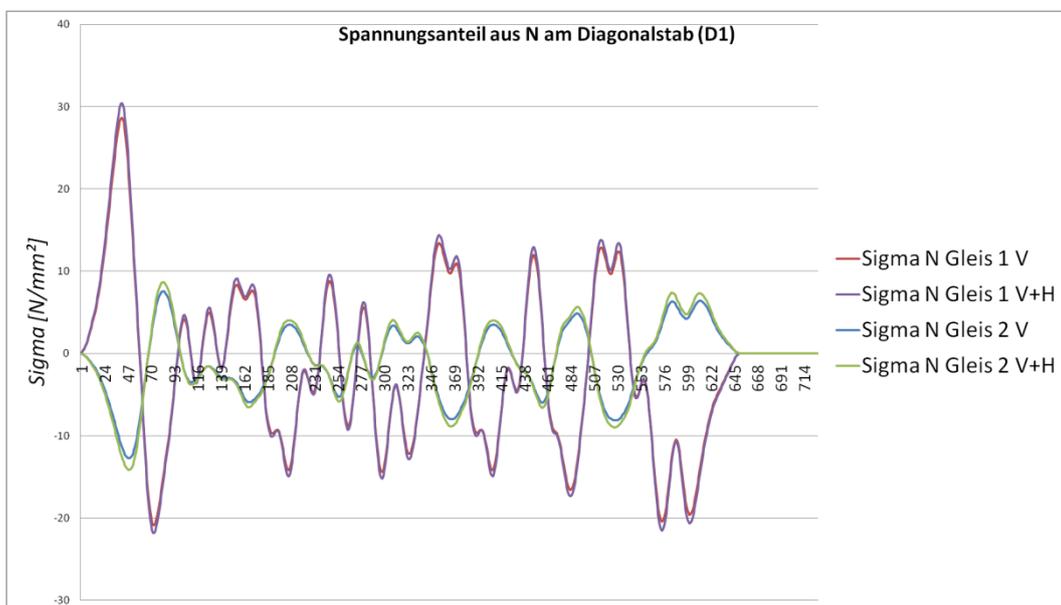
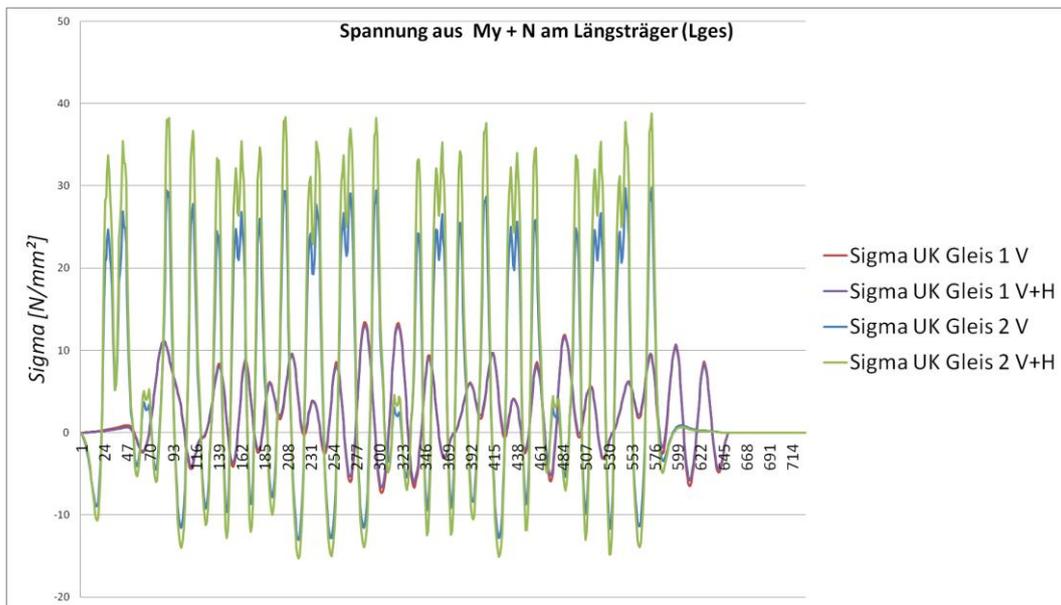
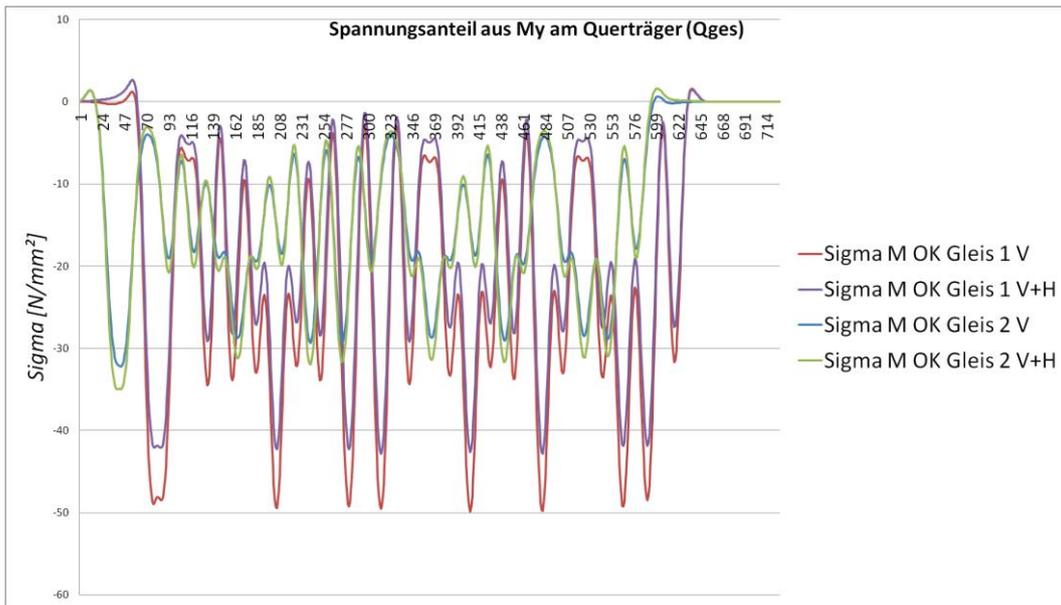


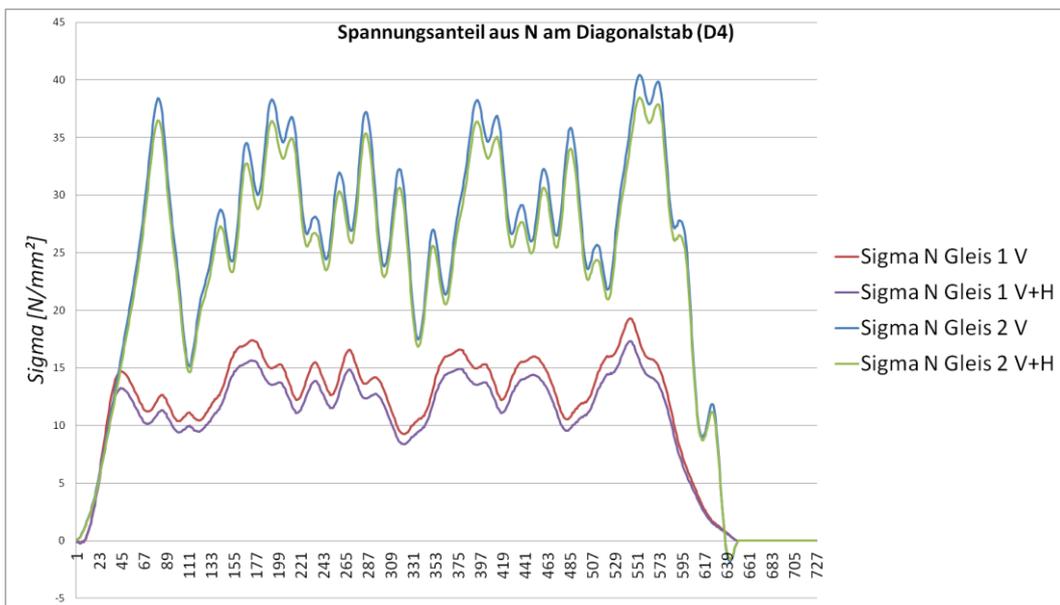
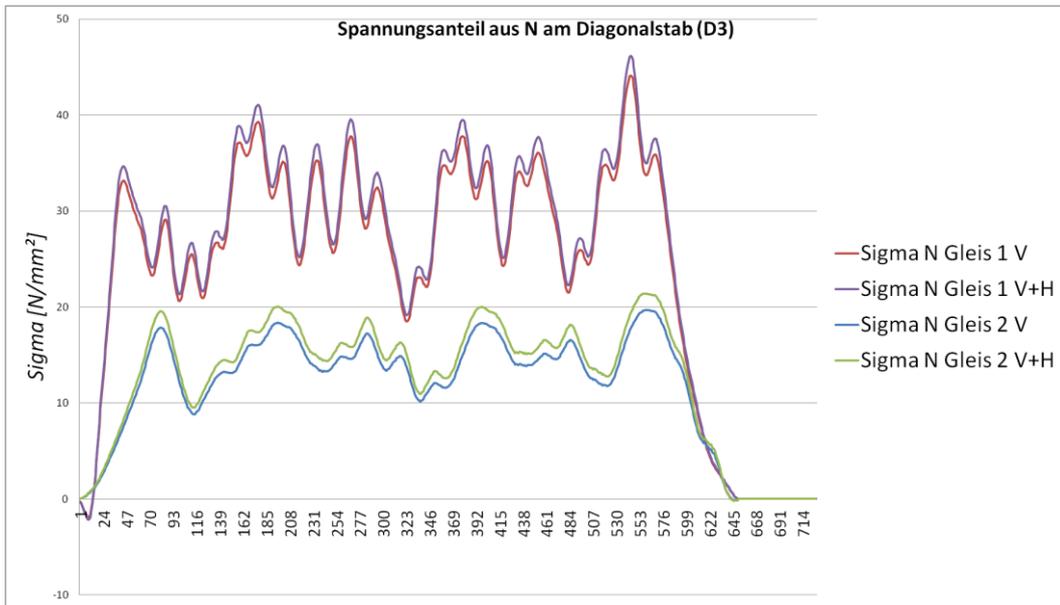
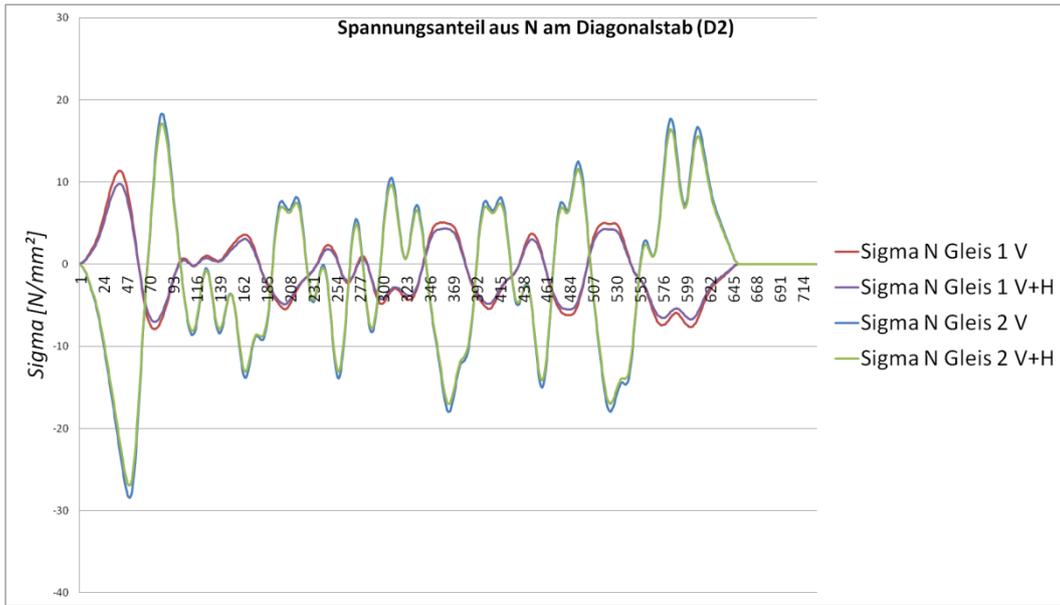


D.3. Spannungsverläufe Lastenzug Typ 6

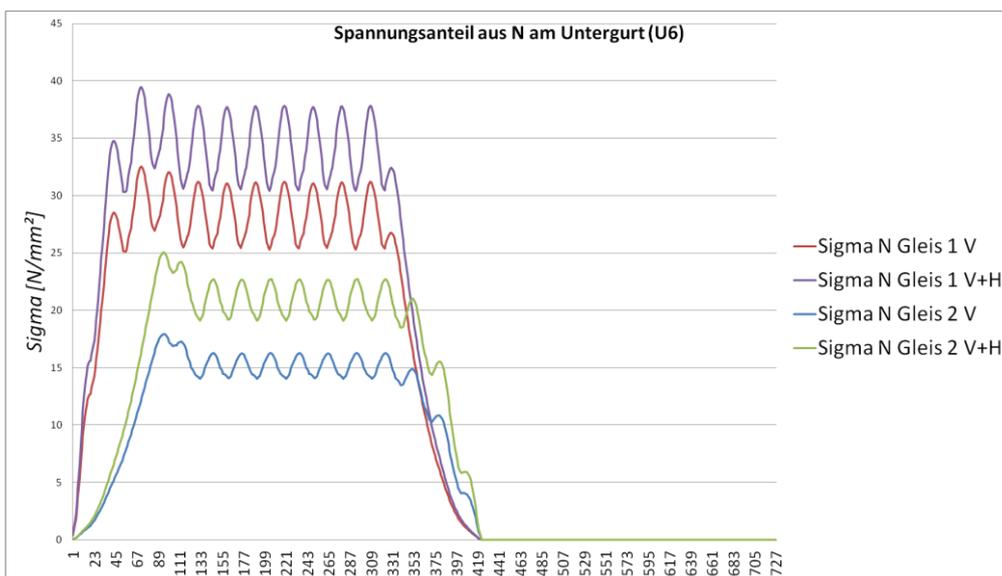
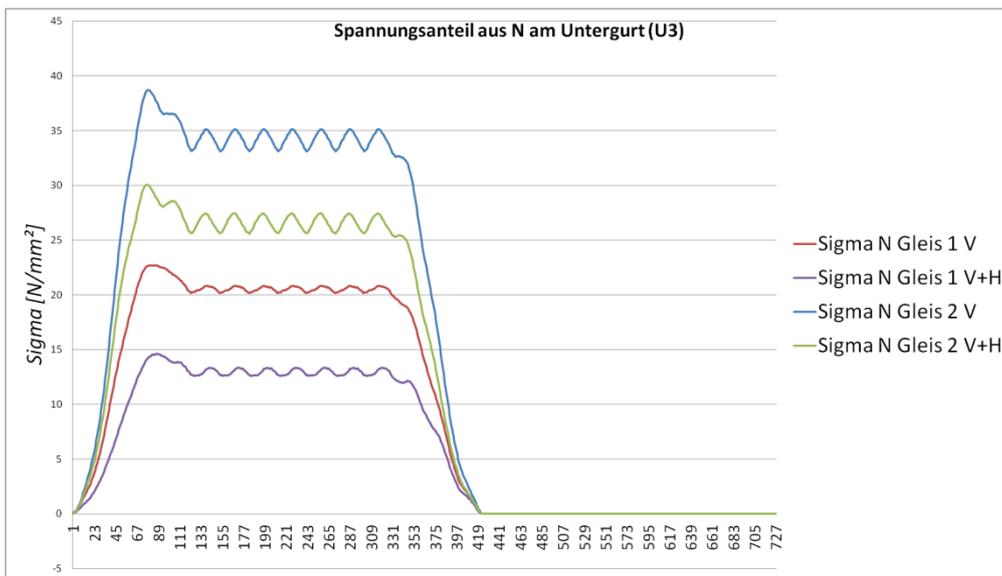
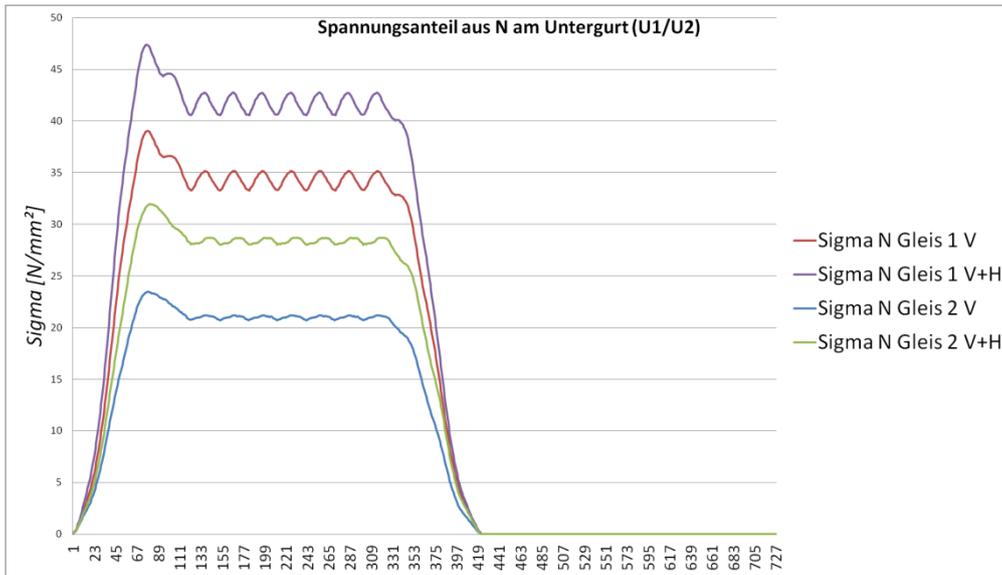


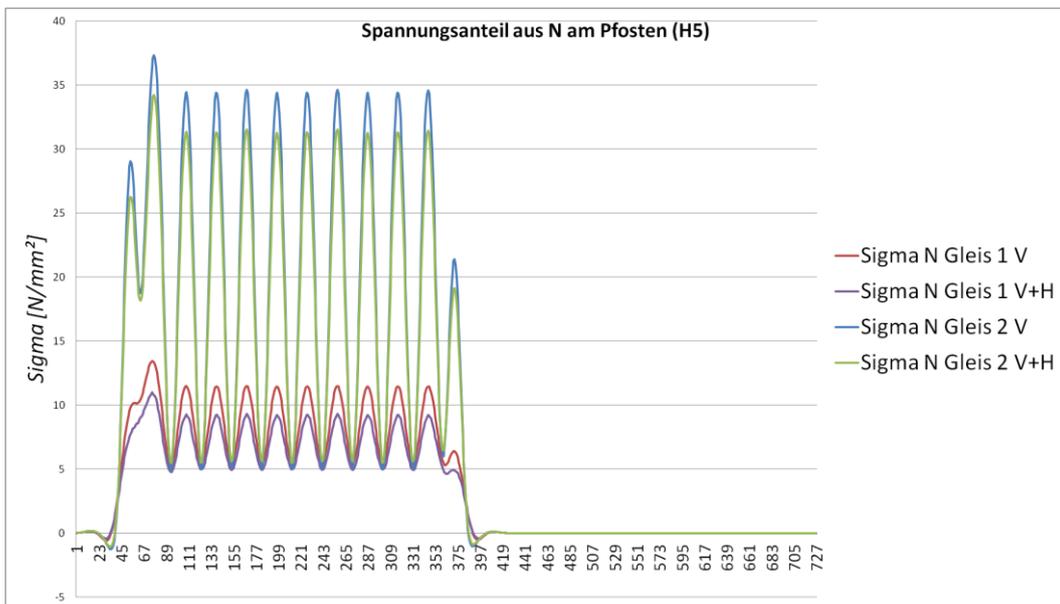
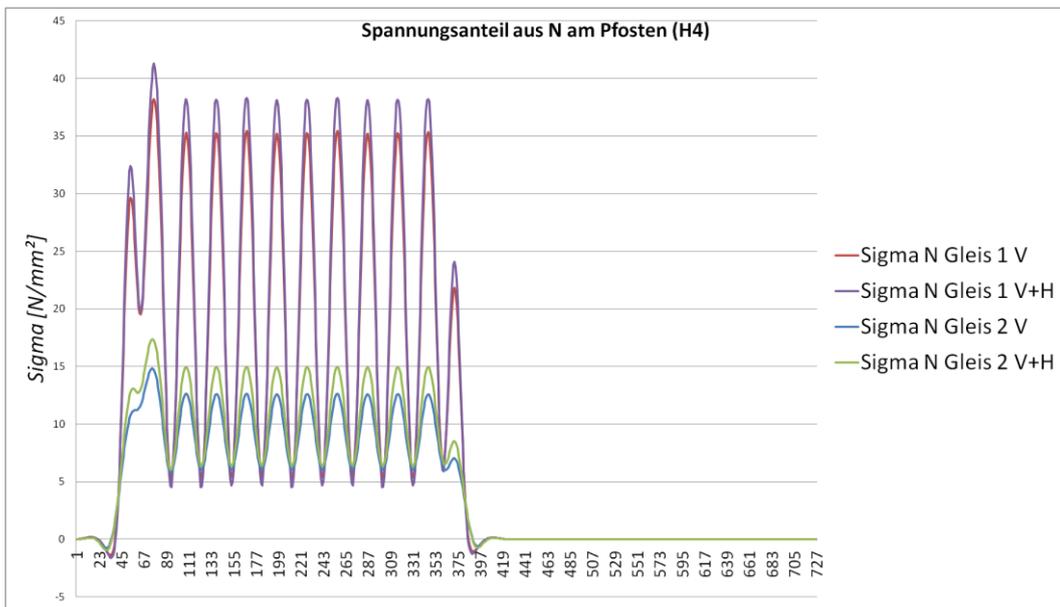
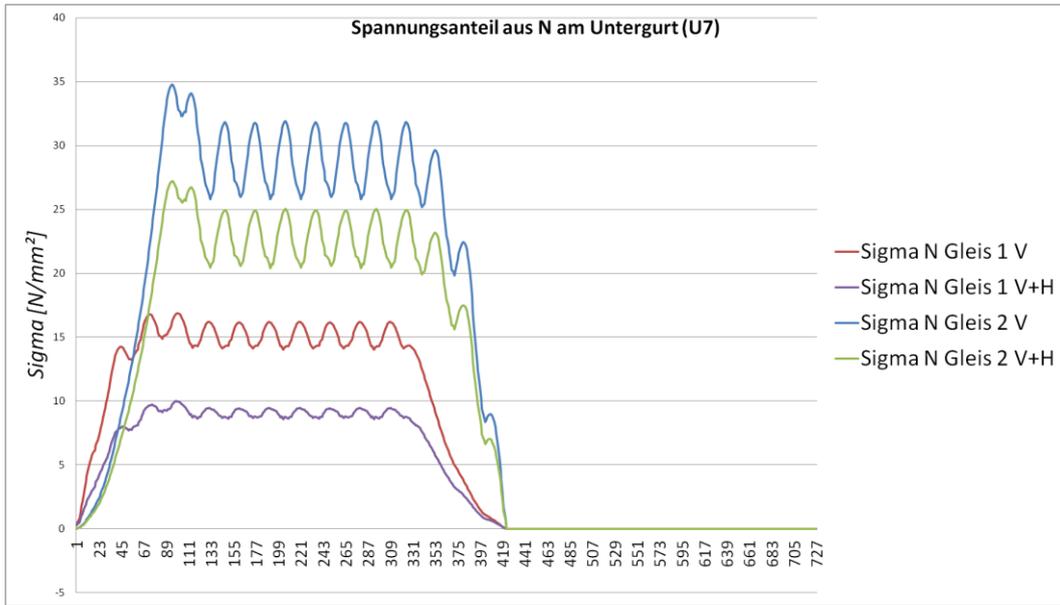


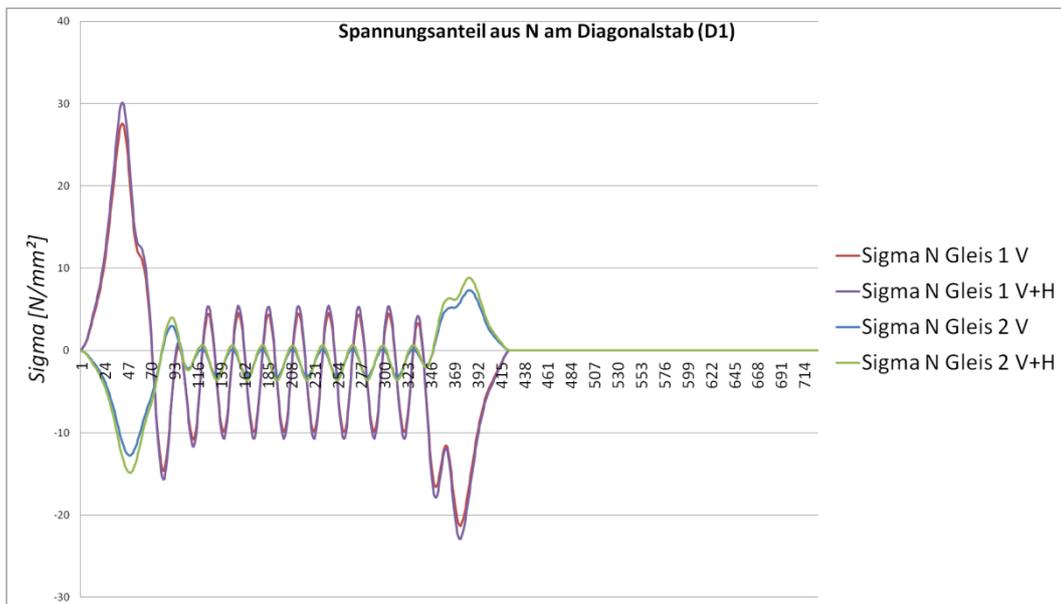
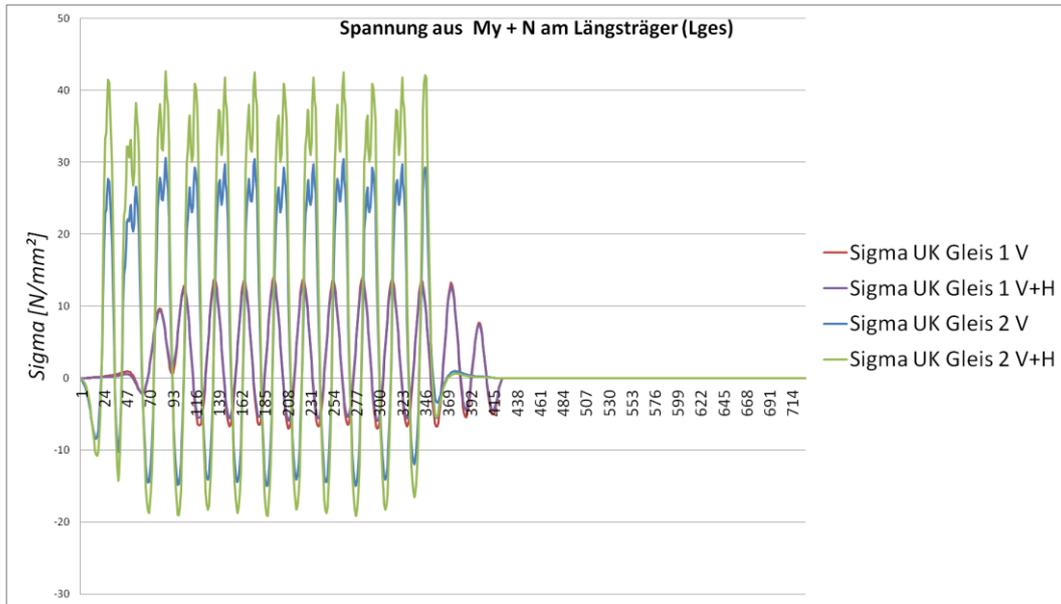
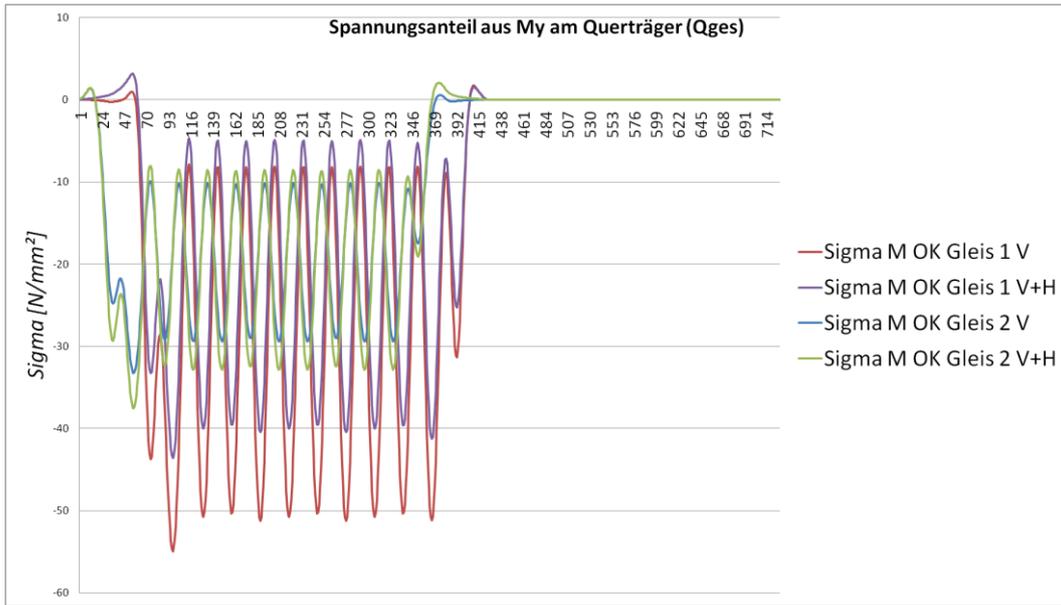


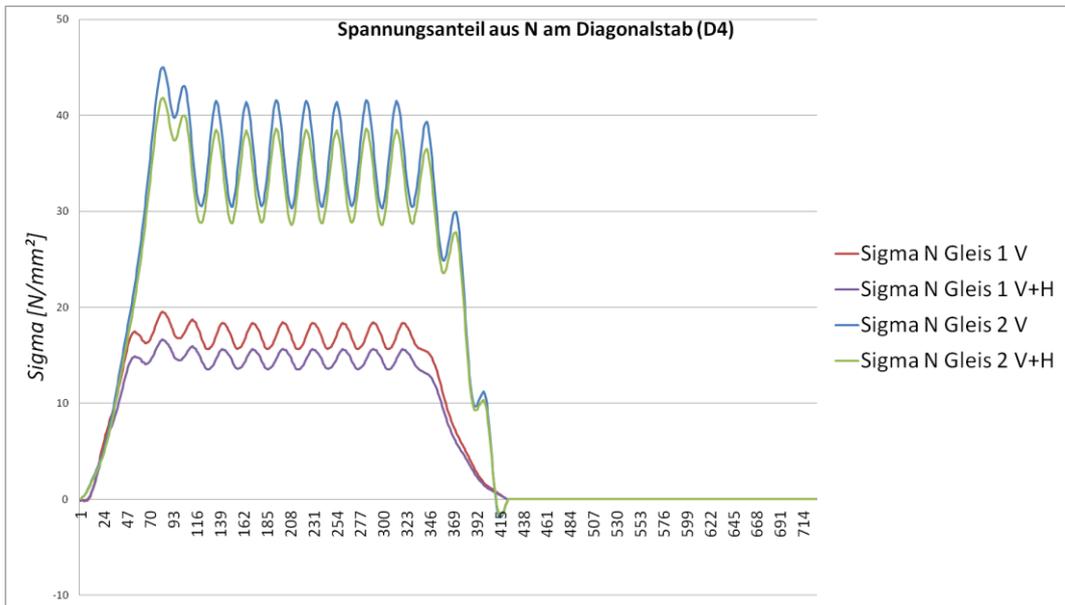
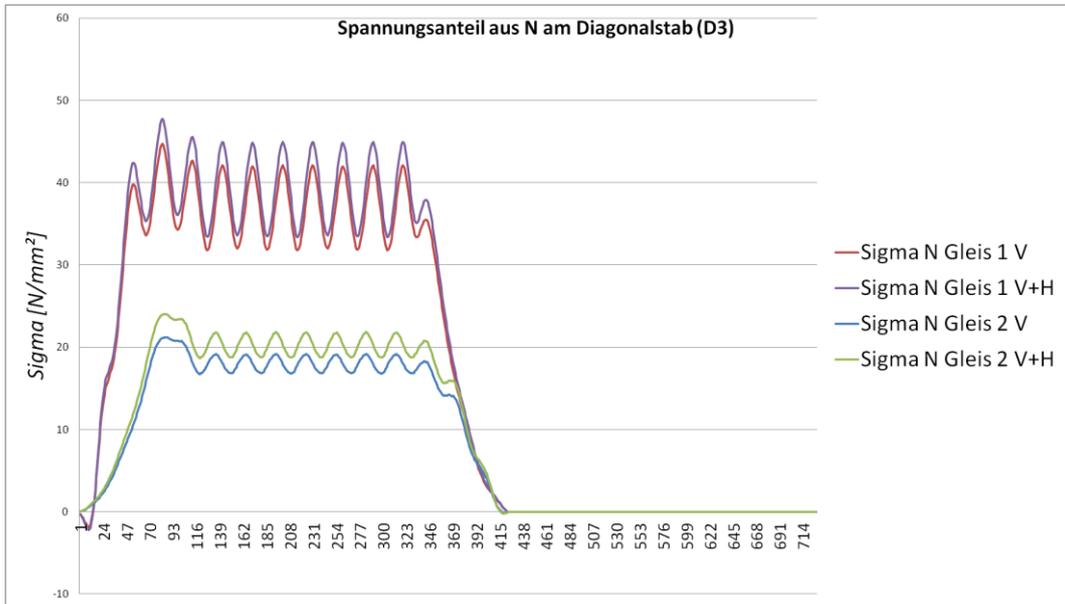
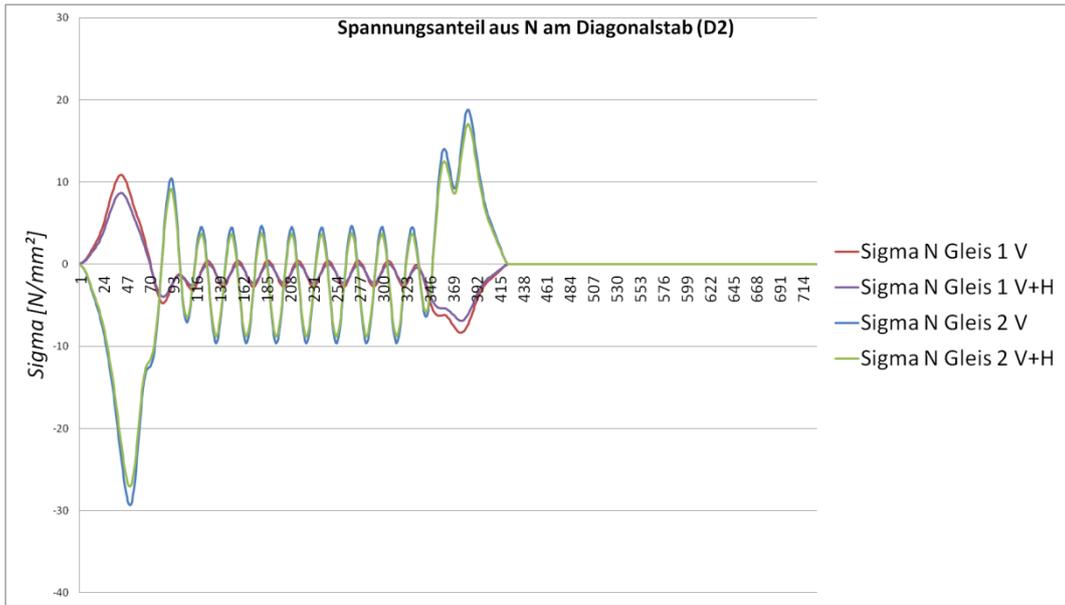


D.4. Spannungsverläufe Lastenzug Typ 7

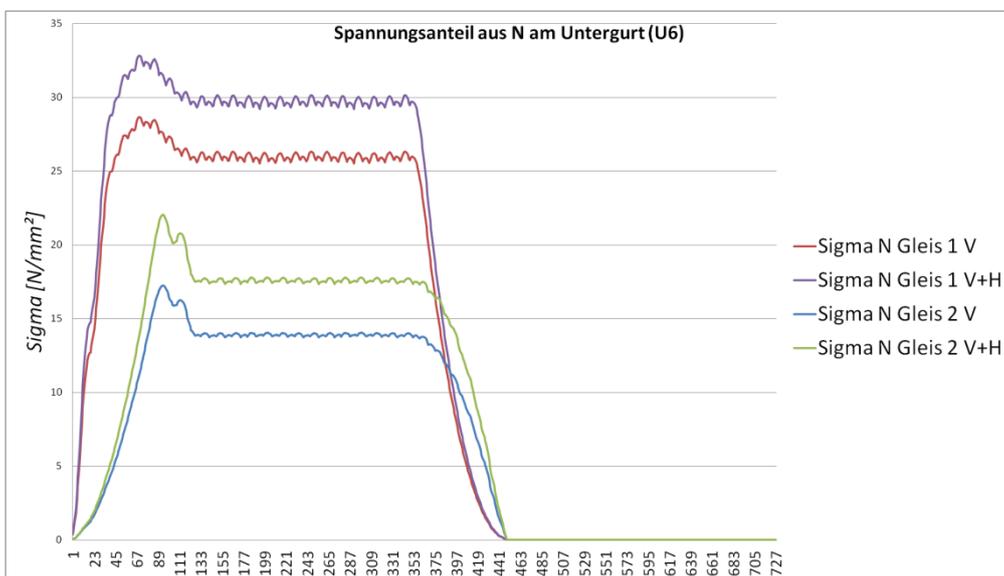
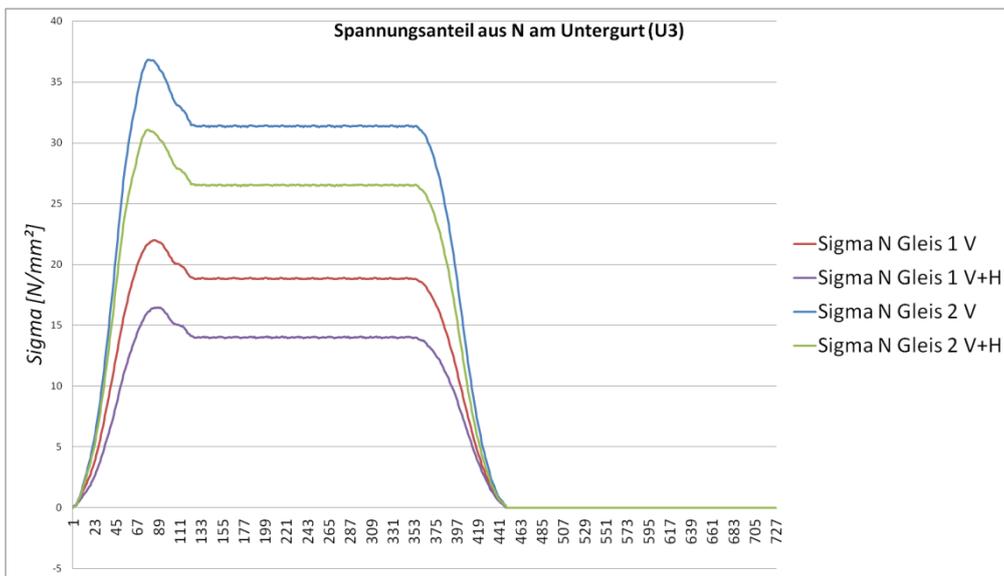
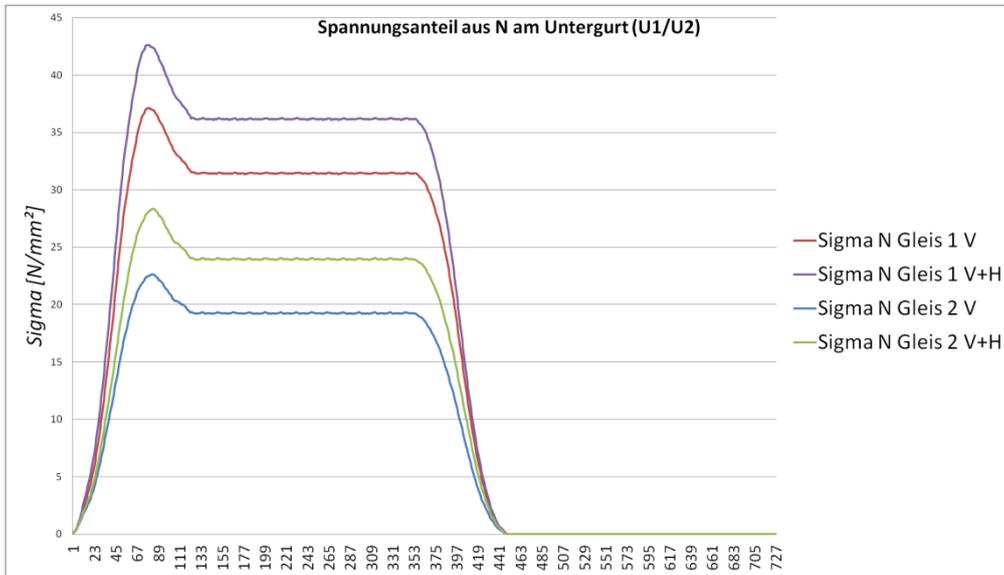


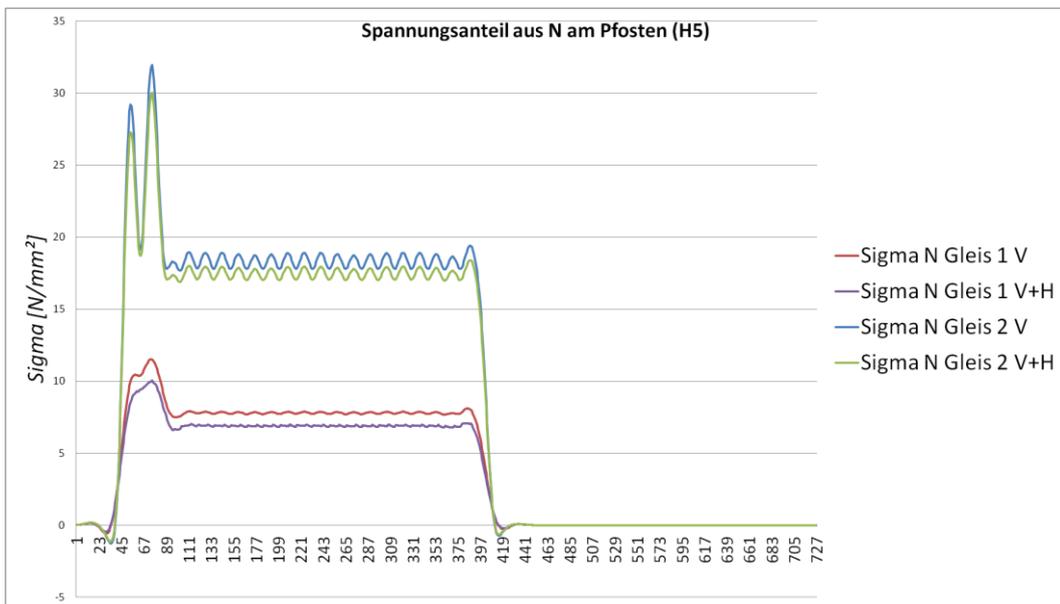
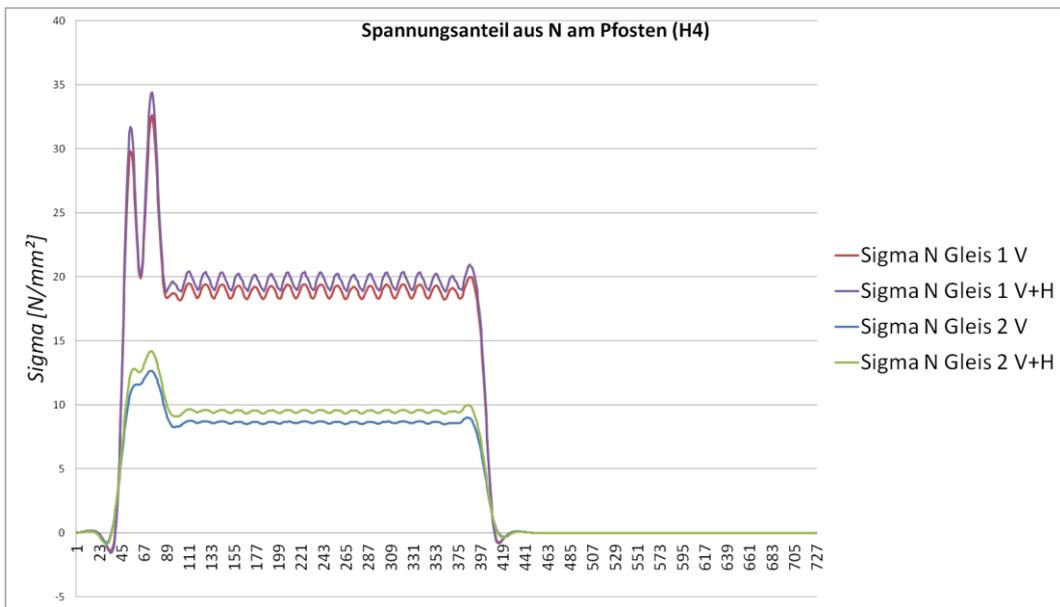
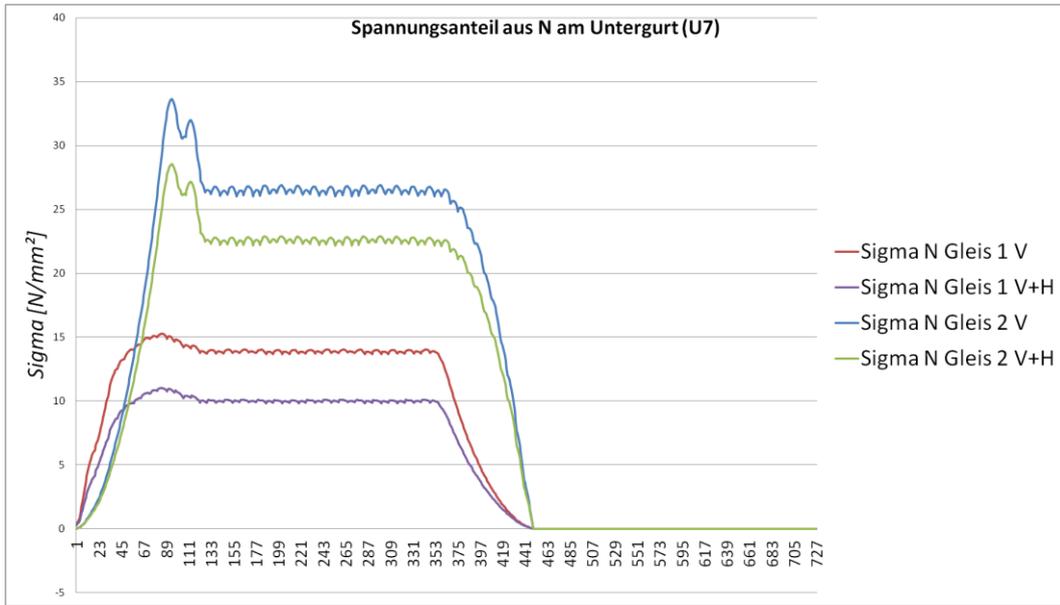


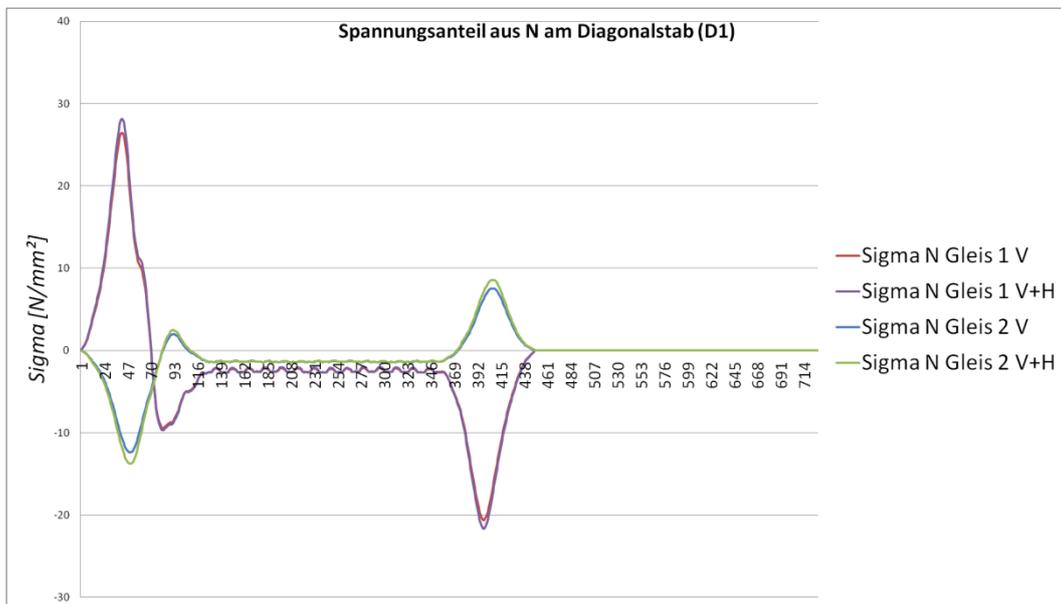
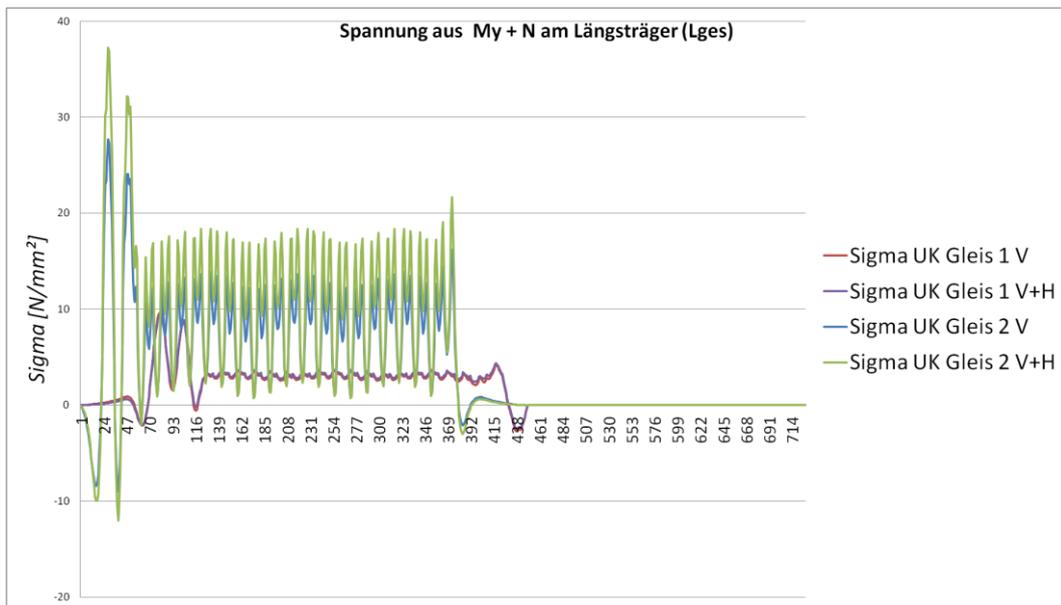
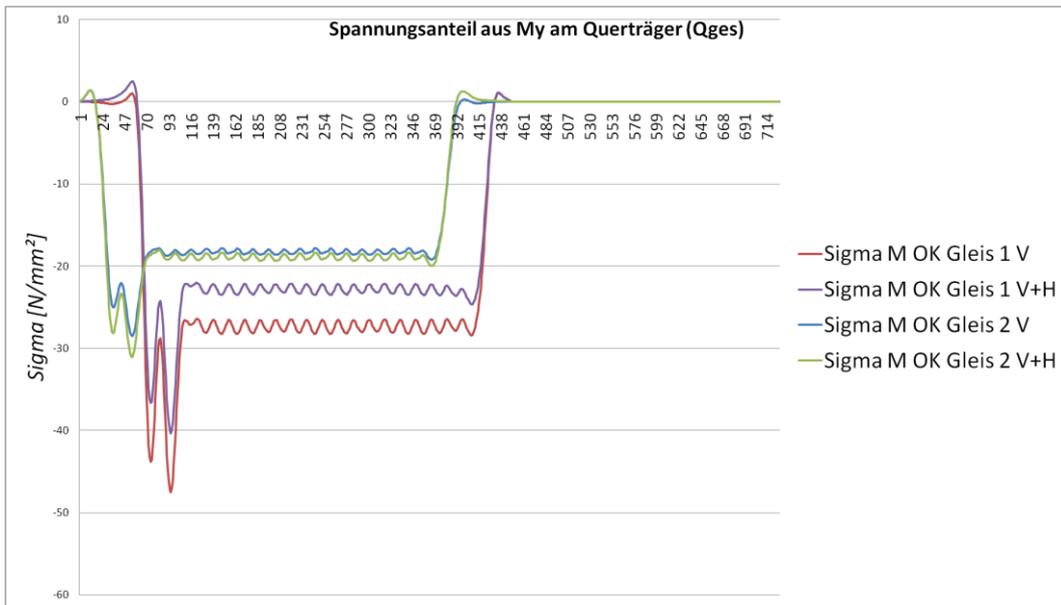


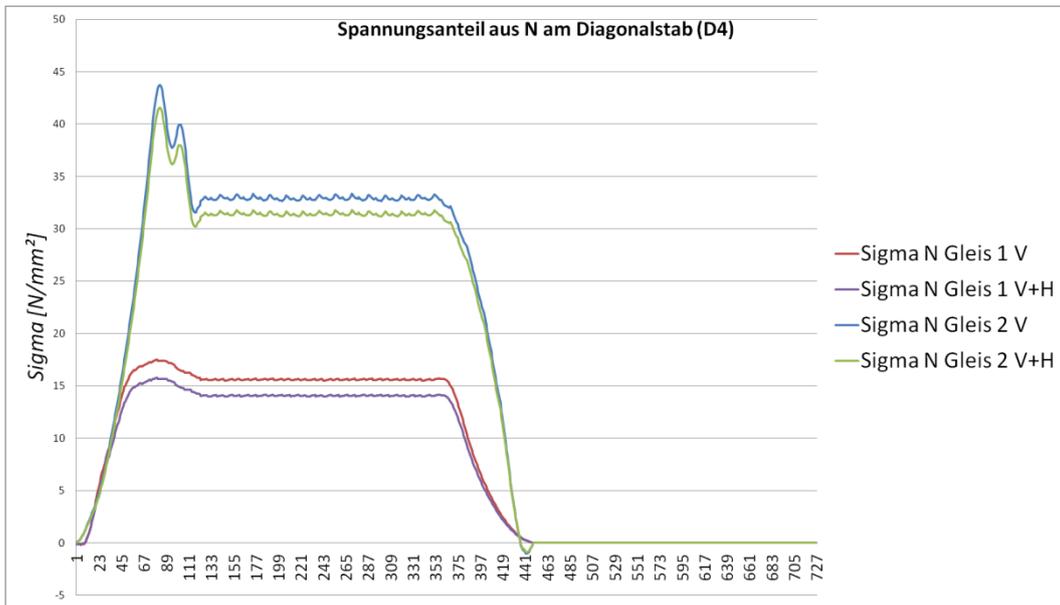
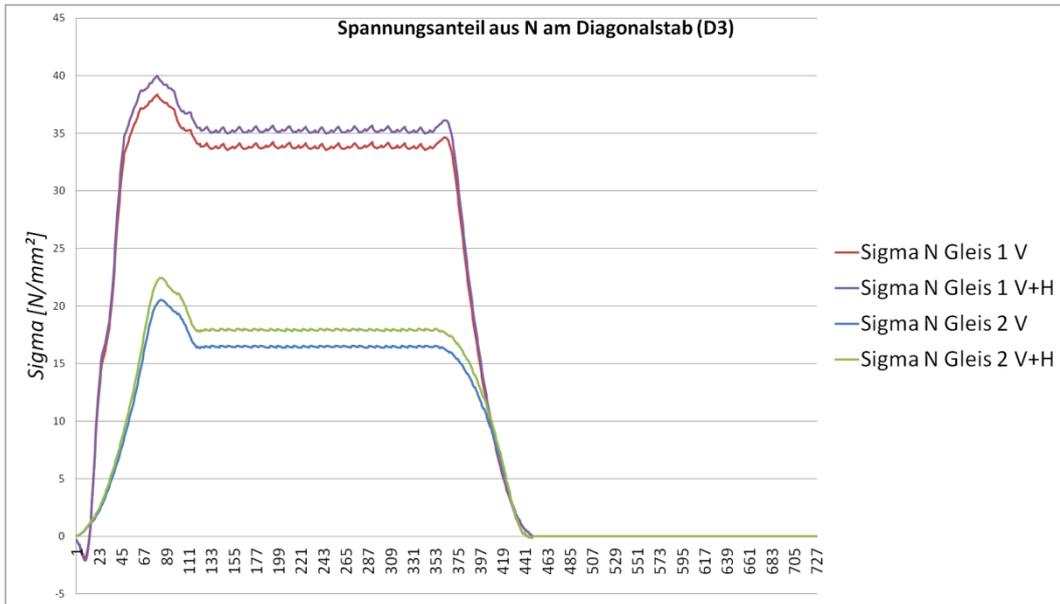
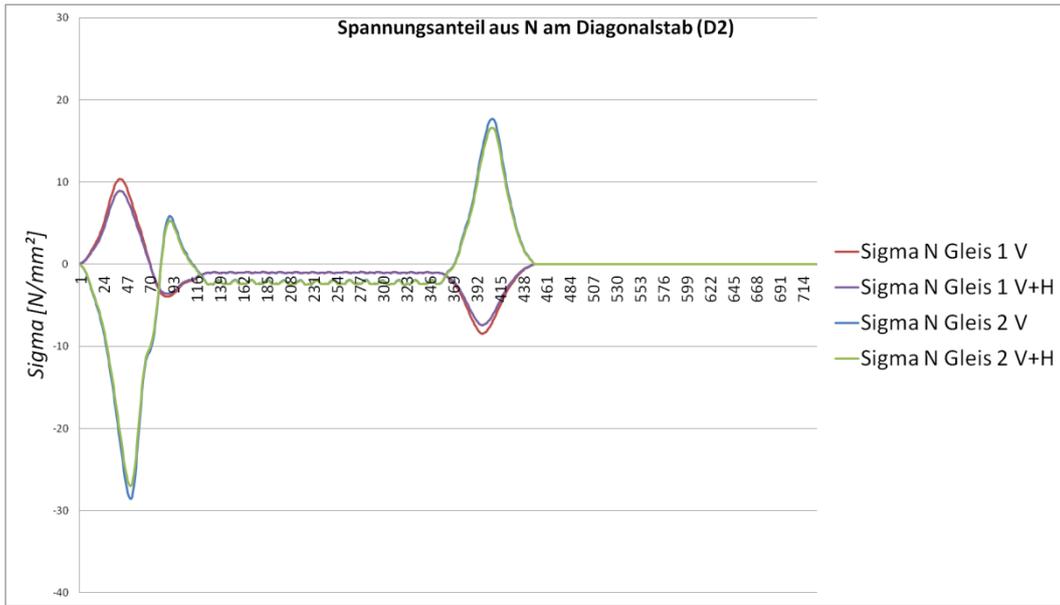


D.5. Spannungsverläufe Lastenzug Typ 8









Anhang E. Spannungskollektive Gleis 1 und Gleis 2

