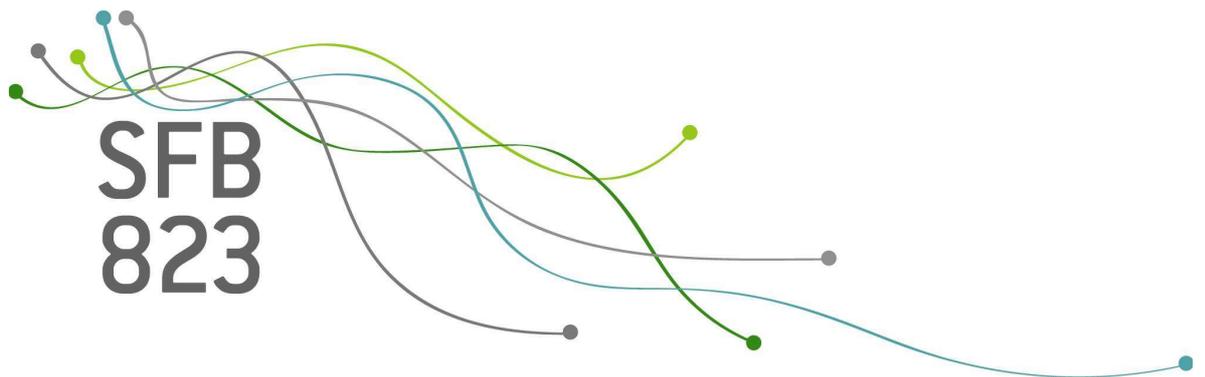


SFB  
823

# Körperschallanalyse der Ermüdung von Spannbetonbauteilen

Julia Dreier, Marlies Hafer, Jens Heinrich,  
Kevin Leckey, Dennis Malcherczyk,  
Reinhard Maurer, Christine H. Müller

Nr. 29/2021



Discussion Paper



# Körperschallanalyse der Ermüdung von Spannbetonbauteilen

Julia Dreier<sup>1</sup>, Marlies Hafer<sup>2</sup>, Jens Heinrich<sup>3</sup>, Kevin Leckey<sup>2</sup>, Dennis Malcherczyk<sup>2</sup>,  
Reinhard Maurer<sup>3</sup>, Christine H. Müller<sup>2</sup>

Technische Universität Dortmund

<sup>1</sup>Institut für Spanende Fertigung, <sup>2</sup>Lehrstuhl Statistik mit Anwendungen im Bereich der Ingenieurwissenschaften, <sup>3</sup>Lehrstuhl Betonbau

## Zusammenfassung

Das Ermüdungsversagen von Spannbetonbauteilen mit Spanngliedern aus mehrdrähtigen Litzenbündeln erfolgt i. d. R. drahtweise. Das Brechen solcher einzelner Spanndrähte kann unter Laborbedingungen akustisch sehr gut exakt erfasst werden. Hier wird untersucht, ob das Brechen der Spanndrähte schon kurz vorher akustisch messbar ist. Dies erfolgte über eine Körperschallanalyse mit 512 Frequenzen im Frequenzbereich 0.003 MHz – 1.562 MHz. Wir beschreiben hier eine Analyse-Möglichkeit, identifizieren Probleme dabei und machen Vorschläge für verbesserte zukünftige Analysen. Insbesondere war es von Nachteil, dass nur in einem zweistündigen Takt zweimal pro Stunde nur für ca. Sekunden gemessen werden konnte. Damit konnte kein Zusammenhang zu den Drahtbrüchen festgestellt werden. Allerdings ergab sich ein Zusammenhang zu einem Steifigkeitsparameter.

## 1. Einleitung

Durch den stetig steigenden Schwerverkehr, sowohl nach Anzahl als auch nach Fahrzeuggesamtgewichten, und den damit verbundenen steigenden Beanspruchungen, kommt es immer wieder vor, dass ältere Verkehrsbauwerke an die Grenzen ihrer Tragfähigkeit stoßen. Solche Bauwerke sind dann entweder zu Verstärken oder nicht selten durch einen Neubau zu ersetzen.

Eine solche Verstärkungs- bzw. Ersatzneubaumaßnahme ist i. d. R. nicht kurzfristig umsetzbar und erfordert eine gewisse zeitliche Planungsphase. So können bis zur Verstärkung oder dem Ersatzneubau einige Jahre vergehen, in der das Bauwerk möglichst weiter unter Verkehr bleiben soll.

Zur Sicherstellung der ausreichenden Tragsicherheit des Bauwerks für den Überbrückungszeitraum können beispielsweise verkehrliche Kompensationsmaßnahmen wie Gewichtsbeschränkung oder das Sperrern einzelner Fahrspuren ergriffen werden. Eine weitere Möglichkeit besteht in einer messwertgestützten Überwachung des Bauwerks (Monitoring).

In *Heinrich et al. (2021)* und *Heinrich und Maurer (2019)* wurde beispielsweise die Überwachung eines bestehenden Brückenbauwerks durch ständige Messung der Rissbreite (Rissbreitenmonitoring) vorgestellt. Dieses Brückenbauwerk wies ein rechnerisches Defizit der Ermüdungsfestigkeit der Spannglieder sowie eine ausgeprägte Rissbildung in den kritischen

Bereichen auf. Durch die ständige Überwachung der Rissbreiten sollten ermüdungsbedingte Spanndrahtbrüche frühzeitig detektiert werden, so dass ggf. rechtzeitig Gegenmaßnahmen (Sperrung und Abstützung) hätten eingeleitet werden können.

Eine Alternative bzw. Ergänzung zu dem Rissmonitoring stellt die Schallemissionsanalyse (SEA) dar. In *Kappahn (1999)* wurde berichtet, dass durch die SEA in Dauerschwingversuchen an Spannbetonträgern signifikante Strukturveränderungen, wie bei einem Spanndrahtbruch, gut nachweisbar sind. In den letzten Jahren wurden zudem vermehrt Untersuchungen an bestehenden Brückenbauwerken mit Schallemissionsmessungen zur Spanndrahtbruchererkennung durchgeführt (*Wedel, Käding und Marx 2019, Schacht et al. 2019*).

Im Zuge eines Forschungsvorhabens der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) innerhalb des Sonderforschungsbereichs SFB 823 Statistical modeling of dynamic processes wurden an der TU Dortmund Ermüdungsversuche an Spannbetonbalken mit Spanngliedern im nachträglichen Verbund durchgeführt (*Heinrich 2017, Heeke, Heinrich und Maurer 2019*). Durch eine kombinierte Mikrofon- und Beschleunigungsmessung an den Ankerbuchsen der Versuchsträger konnten die exakten Bruchzeitpunkte einzelner ermüdungsbedingter Spanndrähte detektiert werden.

Zusätzlich wurde an einigen Versuchsträgern eine Körperschallmessung durchgeführt. Ziel dieser Körperschallmessung war es, das Bauteilverhalten während der Versuchslaufzeit zu untersuchen und möglicherweise frühzeitig Anzeichen für einen sich ankündigenden Drahtbruch zu erkennen. Hierzu sollten Frequenzen gefunden werden, die sich in ihrer Amplitude vor und nach einem Bruch deutlich unterscheiden. Anhand der Amplituden dieser Frequenzen sollte eine Vorhersage ermöglicht werden, ob ein Drahtbruch kurz bevorsteht. Um solche Frequenzen zu finden, wurde mit einem statistischen Klassifikationsverfahren untersucht, ob sich die Messzeitpunkte kurz vor einem Bruch von denen nach einem Bruch mittels der Amplituden der Frequenzen gut unterscheiden lassen. Da dies nicht besonders gut gelang, wurde zusätzlich untersucht, ob die Körperschallmessungen einen Zusammenhang zur zyklischen Steifigkeit aufweisen.

In Abschnitt 2 werden die Experimente an den Spannbetonträgern beschrieben und es wird erläutert, wie die zyklische Steifigkeit erfasst wurde. Abschnitt 3 beschreibt die Durchführung der Körperschallmessungen und Abschnitt 4 liefert eine Beschreibung der dadurch vorliegenden Daten. In Abschnitt 5 befindet sich die statistische Körperschallanalyse für den Versuchsträger mit den meisten Drahtbrüchen. Abschnitt 6 behandelt dann den Zusammenhang zwischen den Körperschallmessungen und den Steifigkeitsmessungen für zwei der untersuchten Spannbetonträger. Schließlich liefert Abschnitt 7 eine Diskussion der Ergebnisse und einen Ausblick.

## 2. Die Experimente an den Spannbetonträgern

### 2.1. Versuchsaufbau und Messsensorik

Bei den Versuchsträgern handelte es sich um Spannbetonbalken mit Vorspannung im nachträglichen Verbund (Abb. 1). Ziel war die Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit von Spanngliedern im Dauerfestigkeitsbereich bei sehr geringen Spannungsschwingbreiten in Verbindung mit sehr großen Lastwechselzahlen bis  $10^8$ .

In den Versuchen konnten die Bruchzeitpunkte der einzelnen Spanndrähte auf die Sekunde genau angegeben werden. Diese Bruchzeitpunkte konnten auch auf eine zugehörige Schwingspielzahl bezogen werden. Eine echte Dauerschwingfestigkeit konnte selbst bei Spannungsschwingbreiten von lediglich  $\Delta\sigma_p = 50 \text{ N/mm}^2$  nicht festgestellt werden.

Zur Detektion eines Spanndrahtbruches wurden mehrere Messsensoren (Mikrofon, Beschleunigungssensor, Wegaufnehmer zur Rissbreitemessung) verwendet. Die Rissbreitemessung erfolgte hierbei in periodischen Abständen, da eine kontinuierliche Messung eine zu große Datenmenge produziert hätte. Die Messung mit dem Mikrofon und dem Beschleunigungssensor erfolgte jedoch getriggert. D.h. sobald ein bestimmter Grenzwert des Mikrofonsignals überschritten wurde, lief eine Messung, die ca. 500 ms rückwirkend mit aufzeichnete. Ein Drahtbruch konnte somit durch drei simultane Messwertereignisse identifiziert werden:

1. Ausschlag der Mikrofonmessung
2. Simultaner Ausschlag der Beschleunigungsmessung
3. Anstieg der Rissbreite aus der periodischen Messung unmittelbar nach der getriggerten Messung.

Für eine detaillierte Beschreibung der Versuchseinrichtung und -durchführung wird auf *Heinrich (2017)* und *Heeke, Heinrich und Maurer (2019)* verwiesen.

### 2.2. Bruchzeitpunkte ausgewählter Versuche

In der Tabelle 1 sind exemplarisch die ersten 20 Bruchzeitpunkte des Versuchs GB07 sowie die sechs Bruchzeitpunkte des Versuchs GL02 aufgelistet. Der Versuch GB07 wies insgesamt noch mehr als die 20 aufgelisteten Drahtbrüche auf, die aus Platzgründen nicht in der Tabelle aufgeführt wurden.



**Abbildung 1** Versuchsstand der Ermüdungsversuche aus, *Heinrich und Maurer (2019)*

**Tabelle 1 Übersicht der ersten 20 Bruchzeitpunkte für die Versuche GB07 und GL02**

Bruch	Versuch GB07			Versuch GL02		
	Schwing- spielzahl	Datum	Zeit	Schwing- spielzahl	Datum	Zeit
1	836.052	19.01.2020	22:00:00	4.596.375	12.12.2019	21:27:54
2	1.834.132	23.01.2020	18:25:02	4.792.890	13.12.2019	05:15:48
3	1.834.333	23.01.2020	18:26:09	4.911.743	13.12.2019	09:58:48
4	1.966.575	24.01.2020	06:40:51	6.042.652	15.12.2019	06:51:30
5	2.119.767	24.01.2020	20:51:56	7.031.139	15.12.2019	22:05:06
6	2.129.053	24.01.2020	21:43:31	8.458.690	16.12.2019	06:44:07
7	2.266.186	25.01.2020	10:25:23			
8	2.357.050	25.01.2020	18:50:12			
9	2.414.508	26.01.2020	00:09:25			
10	2.414.868	26.01.2020	00:11:25			
11	2.613.459	26.01.2020	18:34:44			
12	2.675.091	27.01.2020	00:17:08			
13	2.680.566	27.01.2020	00:47:33			
14	2.740.782	27.01.2020	06:22:06			
15	2.986.359	28.01.2020	05:06:27			
16	3.295.489	29.01.2020	09:43:53			
17	3.295.618	29.01.2020	09:44:36			
18	3.508.136	30.01.2020	05:25:17			
19	3.576.873	30.01.2020	11:47:10			
20	3.593.049	30.01.2020	13:17:02			

Der Versuche GB07 war der insgesamt siebte Versuch der Versuchsreihe GB bei der neben der Spannstahlbewehrung auch eine schlaaffe Betonstahlbewehrung im gerissenen Querschnitt angeordnet wurde. Die Bezeichnung „GB“ steht hier für gemischte Bewehrung. Beim Versuch GB07 wurde neben dem Spannglied bestehend aus fünf 3/8“-Litzen ( $A_p = 260 \text{ mm}^2$ ) zusätzlich vier  $\varnothing 12$  mm Betonstähle ( $A_s = 452 \text{ mm}^2$ ) im Zuggurt des Versuchsträgers eingebaut.

Auf die Anordnung einer zusätzlichen Betonstahlbewehrung im Riss wurde bei den Versuchen der Reihe GL bewusst verzichtet. Stattdessen wurde bei diesen ein Spannglied aus größeren Litzen (GL) verwendet. Dieses bestand aus drei 0,62“-Litzen und wies trotz geringerer Drahtanzahl eine größere Spannstahlfläche ( $A_p = 450 \text{ mm}^2$ ) auf.

### 2.3. Definition der zyklischen Steifigkeit

Die Dauerschwingversuche wurden kraftgesteuert durchgeführt. Dies bedeutet, dass die Ober- ( $F_{\max}$ ) und Unterlast ( $F_{\min}$ ) der sinusförmig aufgebrachten Lastperioden im Versuch vorgegeben wurde. Die entsprechenden schwellenden Beanspruchungen im Spannglied bzw. Betonstahl im gerissenen Querschnitt blieben somit auch bei einzelnen Drahtbrüchen gleich hoch. Jedoch konnte festgestellt werden, dass die Rissbreite, die ebenfalls messtechnisch erfasst wurde, infolge einzelner Drahtbrüche anstieg.

Das Bauteilverhalten während der Versuchslaufzeit konnte über das Verhältnis der Beanspruchung zur Rissbreite beschrieben werden. Diese Größe wird im Folgenden als zyklische Steifigkeit ( $C_{zyl}$ ) bezeichnet und ist gemäß Gleichung (1) bzw. Abbildung 2 definiert.

$$C_{zyl,i} = \frac{F_{max} - F_{min}}{w_{max,i} - w_{min,i}} = \frac{\Delta F}{\Delta w_i} \quad \text{Gl. (1)}$$

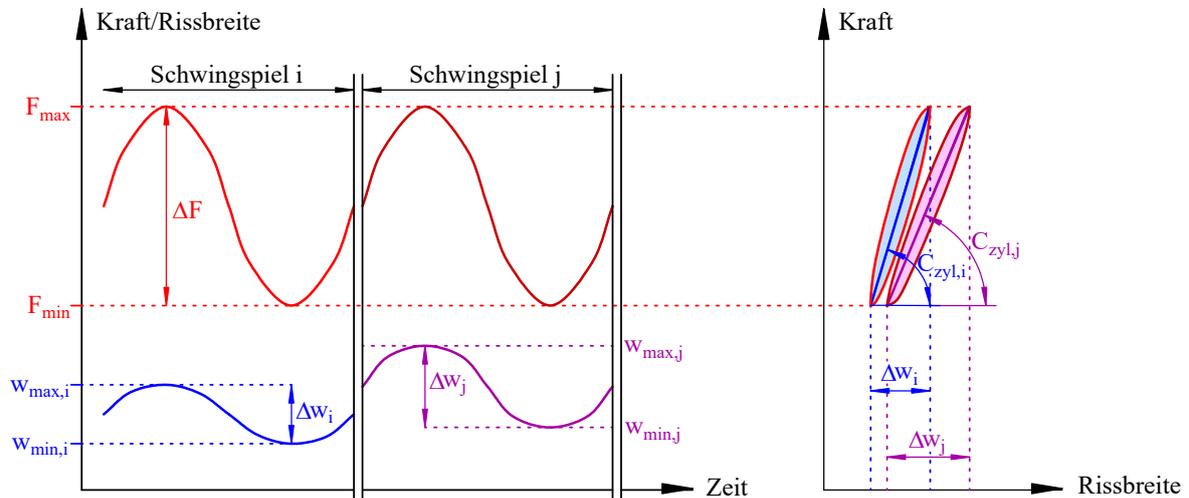
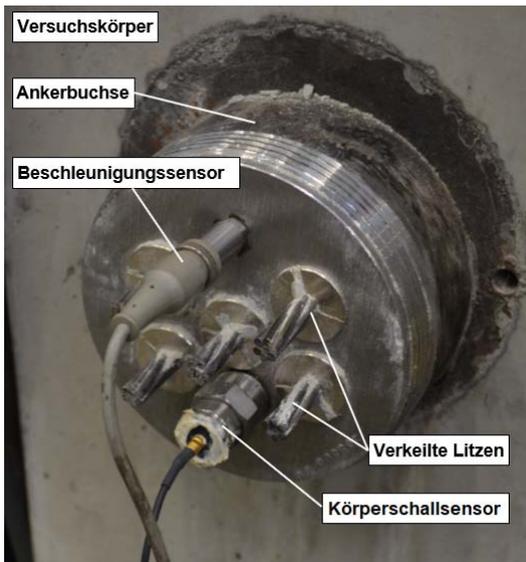


Abbildung 2 Schematische Darstellung der zyklischen Steifigkeit  $C_{zyl}$

### 3. Beschreibung der Körperschallmessungen

Bei einigen Versuchen wurde ein zusätzliches Messgerät zur Körperschallmessung verwendet. Hierzu wurde der Messcomputer Optimizer 4D von der Firma QASS eingesetzt (Abb. 4.). Der Messcomputer ermöglicht eine zerstörungsfreie In-Process-Messung des Körperschalls, wodurch Rückschlüsse auf einsetzende ermüdungsbedingte Bruchzeitpunkte einzelner Spanndrähte getroffen werden können. Dazu wurde an einer der beiden Ankerbüchsen des Versuchsträgers neben den Beschleunigungssensoren und dem Mikrofon ein Sensor zur Aufnahme des Körperschalls installiert (Abb. 3). Über eine Zeitschaltuhr wird alle zwei Stunden, zweimal pro Stunde für ca. zwei Sekunden eine Messung durchgeführt. Hieraus ergeben sich 22-24 Messungen pro Tag. Je Messung werden Frequenzen bis 5000 kHz aufgenommen.



**Abbildung 1 Anschluss der Messsensorik an der Ankerbuchse**



**Abbildung 2 QASS-Messgerät zur Körperschallmessung**

#### 4. Datenbeschreibung

Insgesamt gab es Körperschallmessungen bei 8 Versuchsträgern. Da aber die ersten Analysen schon Probleme aufzeigten, wurden nur die Messungen bei zwei Versuchsträgern genauer analysiert. Das waren die Träger GL02 und GB07.

Die Messungen beim Träger GL02 erfolgten im Zeitraum 28.11.2019 13:53:00 – 20.12.2019 18:21:11. Bei 22-24 Messungen pro Tag wurden insgesamt 519 Intervalle mit einer Länge von ca. 2 Sekunden gemessen. In den 2-Sekunden-Intervallen wurde ca. alle  $32.77 \cdot 10^{-5}$  Sekunden gemessen. Die maximale Anzahl von Messungen, die in allen 519 2-Sekunden-Intervallen vorlag, wurde verwendet. Das entsprach dem Intervall von 0 bis 1,98148096 s und lieferte jeweils 6048 Beobachtungen pro Messzeitpunkt. Bei den Messungen wurden 512 Frequenzen in 0.001-er Schritten von 0.001 MHz bis 0.390 MHz erfasst. Die Messungen zur zyklischen Steifigkeit fanden dagegen im Zeitraum 02.12.2019 8:54:22 - 06.01.2020 10:02:14 statt und ergaben 19608 Messungen, wobei der Abstand zwischen den Messungen zwischen 0.02 min und 3.35 min lag. Bei diesem Träger wurden nur 6 Drahtbrüche beobachtet.

Die Messungen beim Träger GB07 erfolgten dagegen im Zeitraum 16.01.2020 16:04:23 – 09.02.2020 10:13:19, ebenfalls in ungefähr einem zweistündigen Takt, wobei wieder zweimal pro Stunde ca. 2 Sekunden gemessen wurde. Dies ergab insgesamt 557 Messzeitpunkte. In den 2-Sekunden-Abschnitten wurde alle  $8.19 \cdot 10^{-5}$  Sekunden gemessen. Für die statistische Analyse wurden davon nur die Messungen verwendet, so dass gerade 2 Sekunden überschritten waren, d.h. 0 – 2.0000768 s. Dies lieferte 24416 Beobachtungen pro Messzeitpunkt. Hier wurden insgesamt wurden 512 Frequenzen in 0.003-er Schritten von 0.003 MHz – 1.562 MHz erfasst. Zur Erfassung der zyklischen Steifigkeit wurde der Zeitraum 16.01.2020 16:33:38 – 05.02.2020 07:25:18 mit 5284 Messungen verwendet, wobei der

Abstand zwischen den Messungen zwischen 0.03 min und 5.57 min lag. Bei diesem Träger wurden 41 Drahtbrüche beobachtet.

Die Daten stehen auf der Seite <https://www.statistik.tu-dortmund.de/1938.html> frei zur Verfügung. Die statistischen Auswertungen wurden mit 4.0.3 (R Development Core Team 2020) durchgeführt.

## 5. Statistische Körperschallanalyse bei GB07

Da bei GB07 deutlich mehr Drahtbrüche beobachtet wurden, wird die statistische Körperschallanalyse nur für diesem Träger hier vorgestellt. Bei GL02 waren die Befunde noch weniger aussagekräftig.

In der Annahme, dass Mehrfachbrüche einen besonders starken Einfluss auf die Körperschallmessungen haben, wurden zuerst nur solche Bruchzeitpunkte betrachtet, bei denen mindestens zwei Brüche innerhalb von zwei Minuten verzeichnet wurden. Davon gab es insgesamt sechs Bruchzeitpunkte. Dabei wurden die Messzeitpunkte direkt vor und nach diesen Bruchzeitpunkten verwendet und jeweils zu 123 Beobachtungen ausgedünnt, indem jede 200. Beobachtung nur genutzt wurde. Dadurch sollte erreicht werden, dass die Beobachtungen im Zwei-Sekunden-Intervall annähernd als stochastisch unabhängig angesehen werden können und mit einer Klassifikationsmethode daraufhin untersucht werden können, ob diese sich in Intervallen vor und nach einem Bruch unterschiedlich verhalten. Als Klassifikationsmethode wurde der Random Forest von *Breiman (2001)* (R-Funktion *randomForest* aus dem R-Paket *randomForest* von *Liaw und Wiener (2002)* mit *ntree*=1000 und *mtry* =  $\lfloor \sqrt{512} \rfloor = 22$ .) verwendet. Damit wurden dann für jeden dieser Bruchzeitpunkte die bzgl. des Kriteriums der Mean Decrease Accuracy zehn wichtigsten Frequenzen ermittelt, die am besten zwischen den jeweils 123 Beobachtungen pro Messpunkt vor und nach dem Bruchzeitpunkt klassifizieren konnten.

Tabelle 2 zeigt die ermittelten Frequenzen. Dabei zeigt sich, dass manche Frequenzen immer wieder vorkommen. Die 12 Frequenzen, die mindestens einmal an Rang 1 oder 2 oder mindestens zweimal unter Rang 1-10 auftraten, waren

0.125, 0.247, 0.476, 0.482, 0.613, 0.616, 0.888, 0.918, 0.921, 0.924, 1.223, 1.355 MHz.

Abbildung 5 zeigt in einem Spektrogramm (siehe Wikipedia für dessen Definition) den Verlauf der Amplituden dieser 12 Frequenzen über die ersten 460 der 557 Messzeitpunkte wobei die weißen senkrechten Striche die Bruchzeitpunkte anzeigen. Für die farbliche Darstellung wurden die R-Pakete *RColorBrewer* und *heatmap* verwendet, und es wurden nur die ersten 460 Messzeitpunkte genutzt, weil kurz danach kein weiterer Bruch beobachtet wurde und sich außerdem danach die Amplituden so stark verringerten, dass vorherige Änderungen nicht mehr sichtbar waren. Als Amplitude einer Frequenz zu einem Messzeitpunkt wird dabei jeweils der Median der Amplituden über alle Beobachtungen des jeweiligen Messzeitpunktes benutzt. Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn statt dem Median der Mittelwert benutzt wird. Anschließend wurde noch zeilenweise standardisiert (also Werte innerhalb einer Frequenz wurden mittels Mittelwert und Standardabweichung über alle Messzeitpunkte standardisiert). Aus Abbildung 5 ist nicht ersichtlich, dass es einen Unterschied der Amplituden dieser 12

Frequenzen vor und nach den Bruchzeitpunkten gibt. Dies ist auch nicht verwunderlich, da der Anteil der richtig klassifizierten 2\*123 Beobachtungen bei den 6 Bruchzeitpunkten nur zwischen 0.53 und 0.82 lag, siehe letzte Zeile von Tabelle 2. Problematisch ist hier insbesondere, dass der Messzeitpunkt, der am dichtesten vor dem Bruchzeitpunkt lag, in fast allen Fällen über 10 Minuten davor lag und bis zu 104 Minuten groß war, siehe erste Zeile von Tabelle 2.

Aus diesem Grund, wurden in einem zweiten Ansatz die acht Bruchzeitpunkte mit dem kürzesten Abstand eines Messpunktes davor analysiert. Hier bewegen sich diese Abstände zwischen 0.53 Minuten und 12.97 Minuten. Es wurden wieder pro Bruchzeitpunkt die 10 Frequenzen mit der höchsten Mean Decrease Accuracy beim Random Forest bestimmt und dann 13 Frequenzen ermittelt, die mindestens einmal einen Rang 1 oder 2 oder mindestens zweimal unter Rang 1-10 auftraten. Das waren

0.363, 0.375, 0.470, 0.473, 0.476, 0.479, 0.613, 0.616, 0.918, 0.921, 0.924, 1.223, 1.562 MHz.

Zum Teil sind es die gleichen Frequenzen, die schon bei mindestens zwei Brüchen innerhalb von zwei Minuten bestimmt wurden. Entsprechend ähnlich sah das Spektrogramm dazu aus, so dass wieder kein Zusammenhang der Frequenzen zu den Brüchen feststellbar ist.

**Tabelle 2: Auswahl wichtigster Frequenzen basierend auf Messzeitpunkten direkt vor bzw. nach mehreren Brüchen innerhalb von zwei Minuten**

Messzeitpunkte	168	217	297	365	431	460
	169	218	298	366	432	461
Zeit bis Bruchzeitpunkt [min]	12.85	104.12	77.70	12.97	0.53	17.77
Zeit nach Bruchzeitpunkt [min]	106.53	1.37	27.73	0.08	12.87	48.68
Zehn wichtigste Frequenzen [MHz] (basierend auf Mean Decrease Accuracy)	0.476 0.921 1.156 0.421 0.659 0.760 0.888 1.248 0.690 1.562	0.921 0.918 0.924 0.613 0.985 1.001 0.882 0.049 1.297 1.013	0.125 0.247 0.567 0.921 1.355 0.473 0.924 0.409 1.214 0.888	0.613 0.616 0.934 1.223 1.269 1.190 0.839 0.226 1.144 0.549	0.921 0.918 0.125 0.613 0.372 0.924 0.122 0.381 1.223 0.247	0.482 0.613 1.092 0.476 0.616 1.159 0.479 1.355 1.556 0.278
Anteil richtig klassifiziert (basierend auf OOB error im random forest)	0.53	0.71	0.53	0.63	0.76	0.82

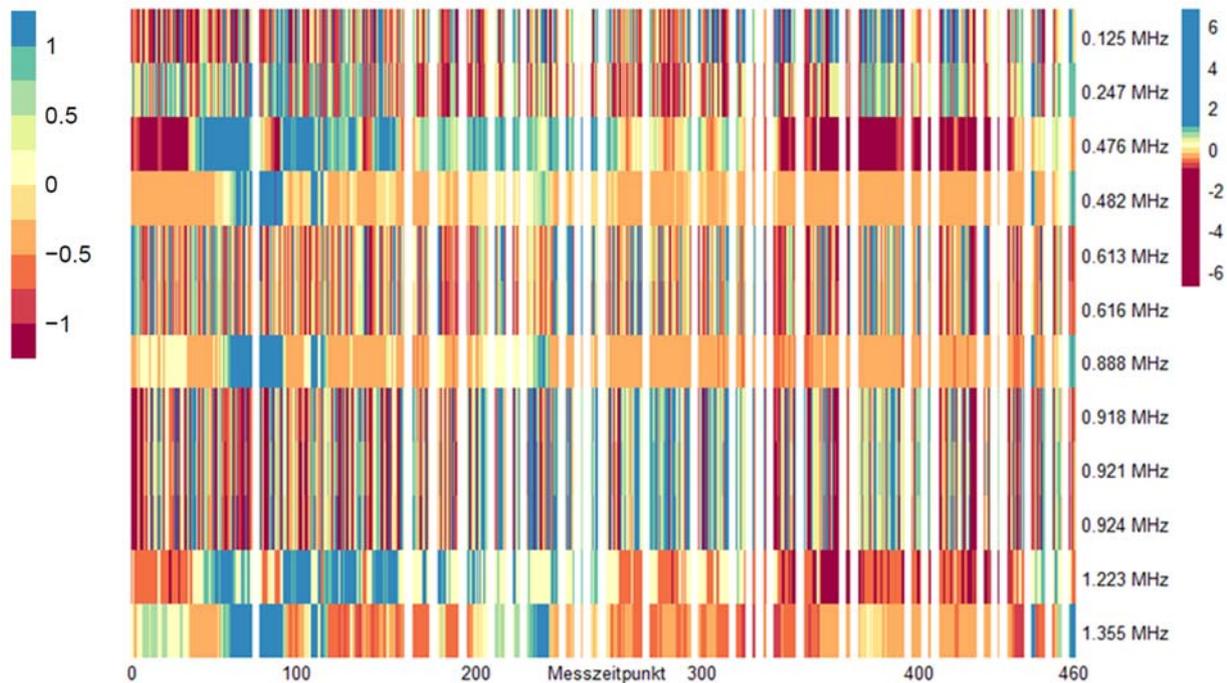


Abbildung 5 Spektrogramm der Auswahl der Frequenzen nach Tabelle 2 (GB07)

## 6. Zusammenhang der Körperschallmessungen zur zyklischen Steifigkeit

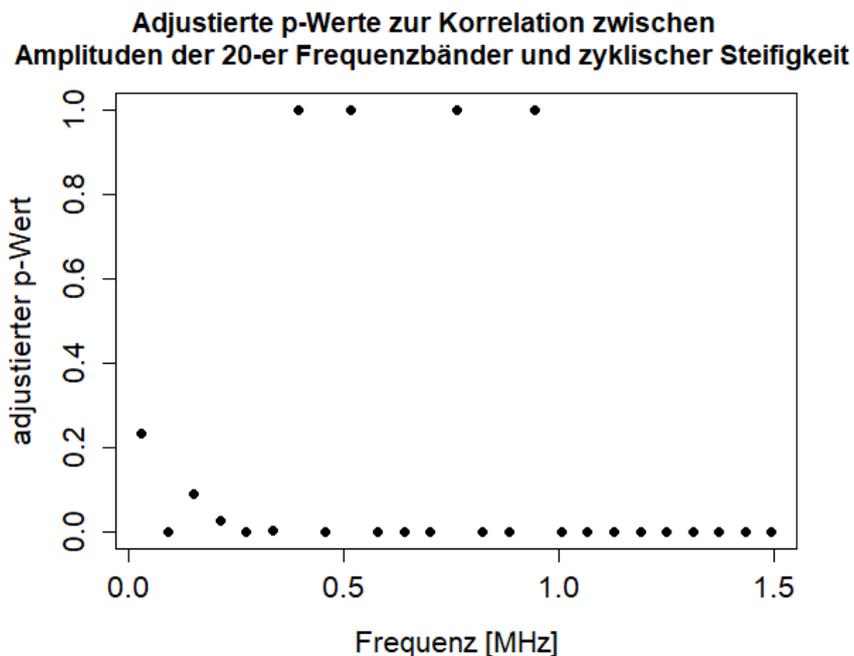
### 6.1. Versuch GB07

Zu jedem der 557 Körperschall-Messzeitpunkte, die im Messzeitraum zur zyklischen Steifigkeit liegen, wurde die zeitlich nächste Beobachtung der zyklischen Steifigkeit zugeordnet. Dadurch wurden die Körperschall-Messzeitpunkte 1-3 und 461-557 weggelassen und es verblieben noch 458 Körperschall-Messzeitpunkte, deren maximaler Abstand zu einem zugeordneten Steifigkeits-Messpunkt 2.77 Minuten betrug. Pro Körperschall-Messzeitpunkt und Frequenz wurde wieder der Mittelwert bzw. der Median der Amplituden berechnet. Aus den 458 Paaren dieser Amplituden und der Steifigkeits-Werte wurde pro Frequenz der Spearman-Korrelationskoeffizient und darauf basierend der bezüglich der 512 Frequenzen adjustierten p-Werte berechnet (d.h. die p-Werte aus `cor.test(, method="spearman")$p.value` wurden mit 512 multipliziert). Für die Definition des Spearman-Korrelationskoeffizienten und dem darauf basierenden Test sowie der Definition eines p-Wertes und der Adjustierung siehe z.B. Müller und Denecke (2013), S. 63 und S. 234, 235 sowie S. 200, 2001. Trotz dieser Adjustierung gab es sehr viele extrem kleine p-Werte, die für einen hohen Zusammenhang zwischen der Steifigkeit und der Frequenz sprechen. So betrug die drei kleinsten p-Werte beim Median der Amplituden  $4.99 \cdot 10^{-25}$ ,  $9.94 \cdot 10^{-25}$  und  $1.37 \cdot 10^{-23}$  und traten bei den Frequenzen 0.540 MHz, 1.547 MHz und 1.489 MHz auf. Beim Benutzen des Mittelwerts der Amplituden waren  $3.02 \cdot 10^{-26}$ ,  $2.00 \cdot 10^{-24}$  und  $2.75 \cdot 10^{-24}$  die drei kleinsten p-Werte und traten bei den Frequenzen 1.062 MHz, 0.586 MHz und 0.937 MHz auf. Die extrem kleinen p-Werte traten dabei sowohl

bei der Benutzung des Medians als auch des Mittelwertes über dem gesamten Frequenz-Bereich von 0.003 MHz – 1.562 MHz auf. Über den gesamten Frequenz-Bereich traten aber auch viele adjustierte p-Werte nahe 1 auf, wo also überhaupt kein Zusammenhang nachweisbar ist. Erstaunlicherweise gab es kaum adjustierte p-Werte zwischen 0.05 und 0.99.

Da es schien, dass sich Frequenzen mit extrem niedrigen p-Werte mit Frequenzen mit extrem hohen p-Werten abwechseln, wurden die 512 Frequenzen zu Frequenzbändern mit jeweils 10 bzw. 20 Frequenzen zusammengefasst. Dabei wurden aus den zuvor gebildeten Medianen bzw. Mittelwerten der Amplituden der einzelnen Frequenzen von jeweils 10 bzw. 20 aufeinanderfolgenden Frequenzen der Mittelwert/Median gebildet. Also z.B. für die 10-er-Bänder wurde die Frequenzen 1-10, 11-20,..., 501-510 zusammengefasst.

Sowohl bei 10-er- als auch 20-er-Bändern und sowohl bei Mittelwertbildung als auch Medianbildung treten wieder kaum adjustierte p-Werte zwischen 0.05 und 0.99 auf und die extrem kleinen p-Werte verteilen sich recht gleichmäßig über die Frequenzbänder.



**Abbildung 6: Adjustierte P-Werte zwischen gemittelten Amplituden der 20-er Frequenzbänder und der zyklischen Steifigkeit bei GB07**

Abbildung 6 zeigt die adjustierten p-Werte zur Korrelation zwischen den zweifach gemittelten Amplituden der 20-er Frequenzbänder und der zyklischen Steifigkeit. Dabei zeigen 18 der 25 Frequenzbänder mit extrem kleinen p-Werten einen hohen Zusammenhang mit der Steifigkeit. Den kleinsten p-Wert besitzt das 14. 20-er Frequenzband 0.796 - 0.854 MHz mit einem adjustierten p-Wert von  $7.51 \cdot 10^{-28}$ . Abbildung 7 zeigt die gemittelten Amplituden dieses Frequenzbandes. Ein Vergleich mit Abbildung 8, welches die zyklische Steifigkeit darstellt, zeigt die Ähnlichkeit zwischen beiden Beobachtungswerten. Ähnliche Ergebnisse ergeben sich

bei anderen Frequenzbändern mit kleinen p-Werte, bei der Medianbildung und bei 10-er Bändern. Ein Zusammenhang zu den Bruchzeitpunkten ist dabei aber auch nicht ersichtlich

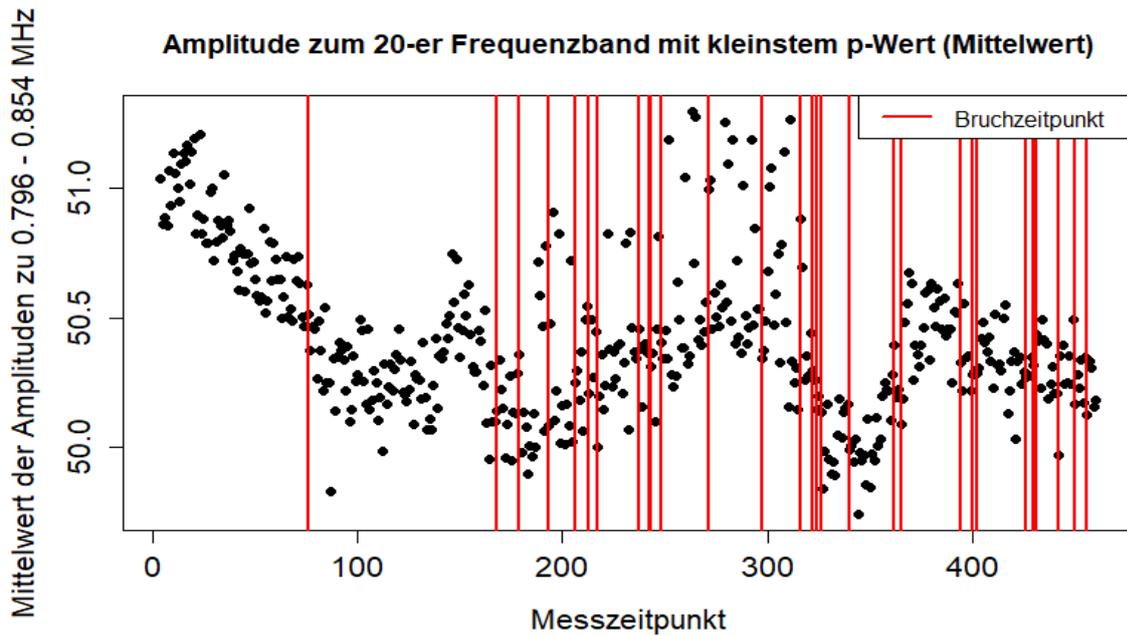


Abbildung 7: Gemittelte Amplituden des 20-er Frequenzbandes mit kleinstem p-Wert und Bruchzeitpunkte bei GB07

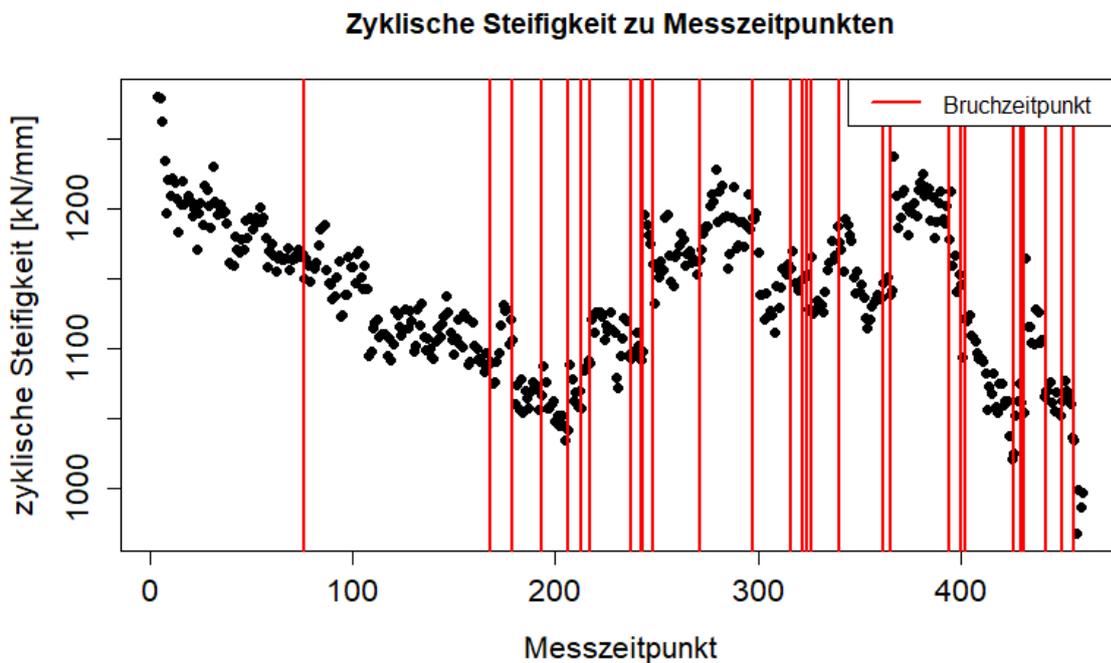
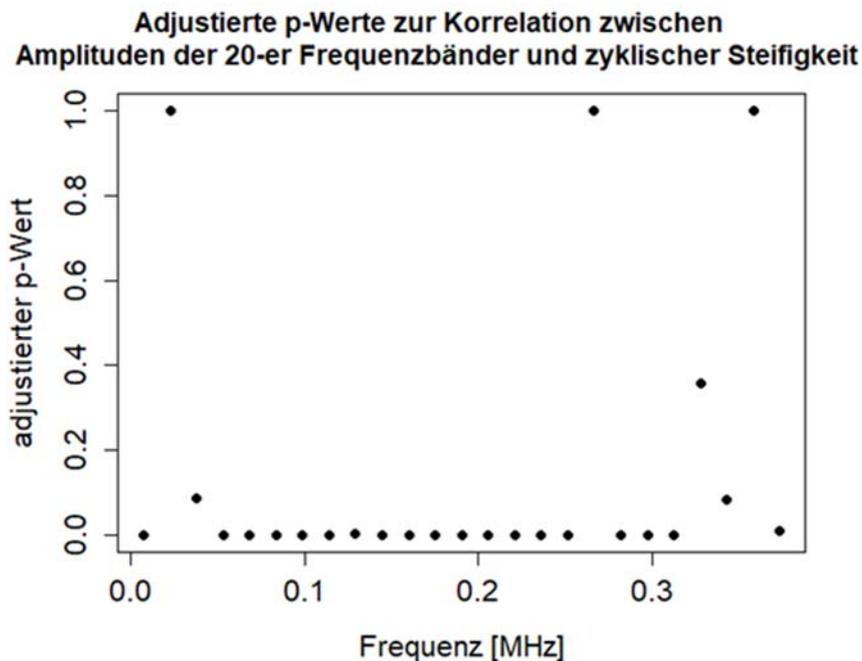


Abbildung 8: Zyklische Steifigkeit und Bruchzeitpunkte bei GB07

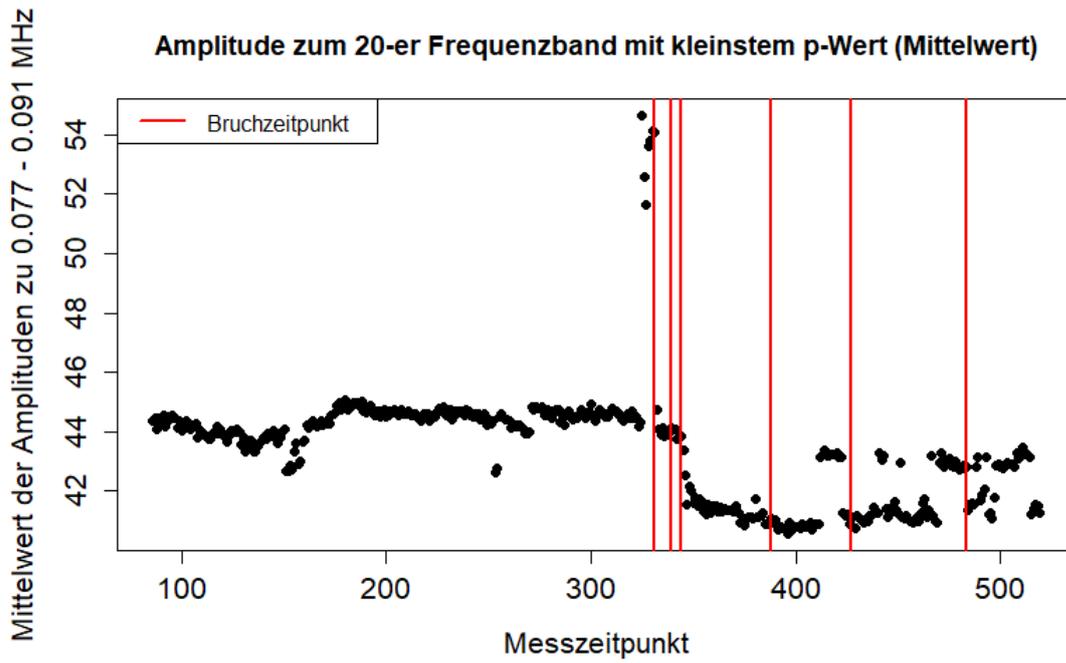
## 6.2. Versuch GL02

Beim Versuchsträger GL02 ergeben sich ganz ähnliche Ergebnisse. Werden von den 519 Messzeitpunkten der Körperschallmessungen nur solche betrachtet, die im Messzeitraum der Daten zur zyklischen Steifigkeit liegen, so fallen die ersten 85 Messzeitpunkte weg. Die verbleibenden 434 Messzeitpunkte werden wieder der zeitlich nächsten Beobachtung zur zyklischen Steifigkeit zugeordnet. Der maximale Abstand zwischen einem Körperschall-Messzeitpunkt und einem Steifigkeits-Messpunkt betrug dabei 1.67 Minuten.

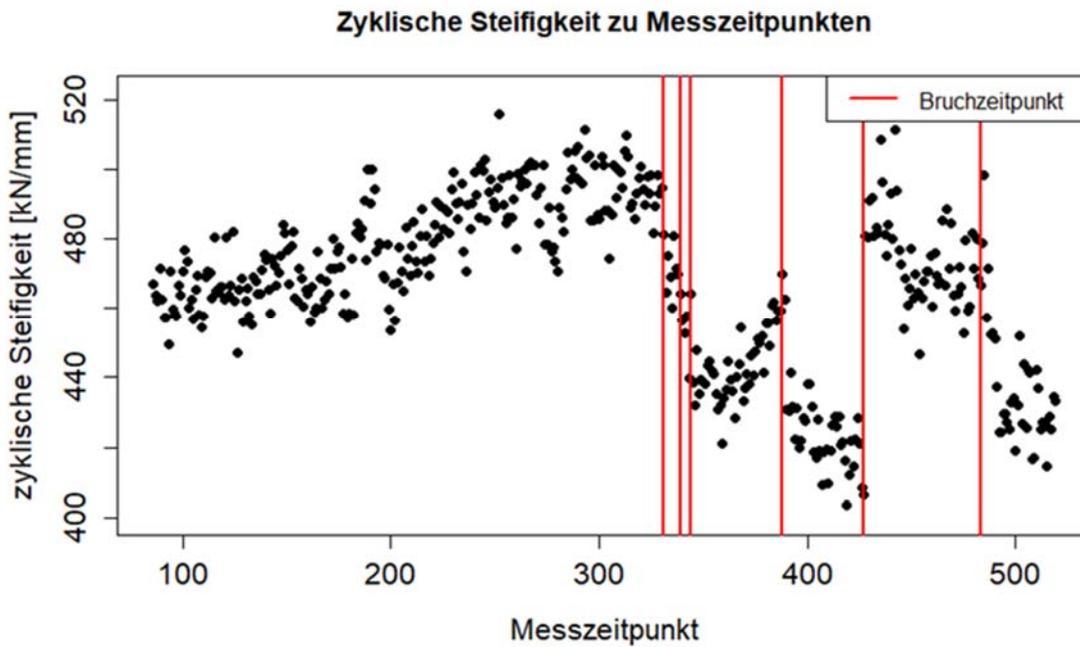
Abbildung 9 zeigt die adjustierten p-Werte für den Korrelations-Test basierend auf dem Spearman-Korrelationskoeffizienten für die 20-er Frequenzbänder bei Mittelwertbildung der Amplituden. Wieder sind die meisten p-Werte extrem klein, was auf einen hohen Zusammenhang zwischen den gemittelten Amplituden und der Steifigkeit hinweist. Den kleinsten p-Wert besitzt das 6. 20-er Frequenzband zu 0.077-0.091 MHz mit einem adjustierten p-Wert von  $2.24 \cdot 10^{-41}$ . Abbildung 10 zeigt die gemittelten Amplituden dieses Frequenzbandes für die einzelnen Messzeitpunkte und Abbildung 11 die zugeordneten Steifigkeitsmesswerte. Wegen der Ausreißer bei den gemittelten Amplituden ist die Ähnlichkeit zwischen beiden Messwerttypen hier nicht so deutlich sichtbar wie bei GB07. Es sieht bei diesem Träger so aus, dass die Brüche Änderungen der Steifigkeit bewirken. Allerdings bewirken manche Brüche einen sprunghaften Anstieg und andere eine sprunghafte Verringerung der Steifigkeit. Bei den Amplituden ist dieser Zusammenhang nicht so stark ausgeprägt.



**Abbildung 9: Adjustierte P-Werte zwischen gemittelten Amplituden der 20-er Frequenzbänder und der zyklischen Steifigkeit bei GL02**



**Abbildung 10: Gemittelte Amplituden des 20-er Frequenzbandes mit kleinstem p-Wert und Bruchzeitpunkte bei GL02**



**Abbildung 11: Zyklische Steifigkeit und Bruchzeitpunkte bei GL02**

## 7. Diskussion und Ausblick

Das Ziel, Zeitpunkte von Drahtbrüchen in Spannbetonträgern vorherzusagen, konnte mit dieser Körperschallanalyse nicht erreicht werden. Insbesondere konnten keine signifikanten Änderungen der Amplituden der gemessenen Frequenzen vor und nach einem Bruch festgestellt werden.

Ein Problem war, dass der Körperschall nicht kontinuierlich erfasst wurde, sondern nur jeweils für 2 Sekunden zweimal alle zwei Stunden. Dadurch gab es Brüche, bei denen die letzte Körperschallmessung davor über 100 Minuten zurücklag. Da eine kontinuierliche Körperschallerfassung zu hohem Speicherbedarf hat, könnte in zukünftigen Studien die Körperschallerfassung nur in den Intervallen gespeichert werden, an denen am Ende ein Bruch registriert wird. Die Frage ist dabei aber die Länge der gespeicherten Intervalle. Würde diese nur wieder 2 Sekunden lang sein, könnte nur kurz vor einem Bruch dieser vorhergesagt werden. Daher wäre so eine Vorhersage von keinem großen Nutzen. Interessanter wäre das schon, wenn der Bruch deutlich früher vorhergesagt werden könnte, z.B. 10 Minuten davor. Aber dann müssten die Körperschallmessungen über entsprechend größere Intervalle gespeichert werden.

Als statistische Methodik wurde hier nur der Random Forest zur Klassifikation von Messzeitpunkten vor und nach einem Bruch anhand der Amplituden der erfassten Frequenzen verwendet. Die Hoffnung war gewesen, Frequenzen zu finden, die sich in ihrer Amplitude signifikant vor und nach einem Bruch so unterscheiden, dass damit eine Vorhersage für den nächsten Bruchzeitpunkt möglich wird. Es konnten aber keine Frequenzen gefunden werden, die sich einheitlich für alle Brüche in ihrer Amplitude signifikant vor und nach einem Bruch unterscheiden. Neben den unterschiedlichen Abständen der Körperschall-Messzeitpunkte vor den Bruchzeitpunkten kann eine Ursache auch in einem falsch gewählten Frequenzbereich liegen. Dabei war dieser nach einer ersten Untersuchung an einem anderen Träger schon angepasst worden. Aber eventuell ist der Bereich immer noch nicht optimal gewählt.

Eine andere Ursache könnte auch in der statistischen Methodik liegen. Um die Datenmenge zu reduzieren, wurden pro Bruchzeitpunkt die Klassifikation zwischen den Körperschallmessungen vor und nach dem Bruch einzeln vorgenommen und daraus Frequenzen mit hoher Trenneigenschaft abgeleitet. Eventuell wären bessere Ergebnisse erzielt worden, wenn die Klassifikation über alle Messzeitpunkte vor und nach einem Bruch gleichzeitig vorgenommen worden wäre oder wenn ein anderes Klassifikationsverfahren mit einer Variablen-Selektion eingesetzt worden wäre. Eine alternative Klassifikation wäre zum Beispiel durch eine regularisierte logistische Regression aus dem R-Paket *glmnet* von *Friedman et al. (2010)* gegeben. Ferner könnte neben der Klassifikation zwischen Messpunkte kurz vor und nach einem Bruch auch eine Regressionsanalyse kombiniert mit einer Variablen-Selektion erfolgreicher sein. Auch hier könnte das R-Paket *glmnet* dafür genutzt werden. Dabei wäre die von den Frequenzen abhängige Variable die Zeit bis zum nächsten Bruch. Allerdings wird diese Abhängigkeit eher nichtlinearer Natur sein. Statt der einzelnen Frequenzen könnten auch Frequenzbänder wie bei der Analyse des Zusammenhangs zur Steifigkeit genutzt werden.

Die extrem niedrigen p-Werte sowohl bei den einzelnen Frequenzen als auch bei den Frequenzbändern sprechen für einen Zusammenhang zwischen den Frequenzen und der zyklischen Steifigkeit. Dabei trat dieser Zusammenhang nicht nur bei speziellen Frequenzen bzw. Frequenzbändern auf, sondern gleichmäßig verteilt über dem ganzen erfassten Frequenzbereich. Hier stellt sich die Frage, ob das bei einem anders gewählten Frequenzbereich auch der Fall ist, und warum dieser Zusammenhang überhaupt auftritt. Hier muss auch angemerkt werden, dass die niedrigen p-Werte nur eine signifikante Abweichung von der stochastischen Unabhängigkeit zwischen Frequenz und Steifigkeit anzeigen. Da bei beiden Versuchsträgern jeweils über 400 Messzeitpunkte zur Bestimmung der Korrelation benutzt wurden, kann der benutzte Test die stochastische Unabhängigkeit schon bei recht kleinen Abweichungen davon verwerfen. Allerdings zeigen die grafischen Vergleiche schon ähnliches Verhalten der Amplituden der Frequenzen mit niedrigen p-Wert und der Steifigkeit.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Sonderforschungsbereichs SFB 823 "Statistical Modelling of Nonlinear Dynamic Processes" der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), der diese Körperschallanalysen im Rahmen einer Zusammenarbeit der Teilprojekte "B4: Statistical process modelling for machining of inhomogeneous mineral subsoil" und "B5: Statistical methods for damage processes under cyclic load" ermöglichte.

## Literatur

- Breiman, L. (2001). Random forests, *Machine Learning*, 45(1), S. 5-32.
- Friedman J, Hastie T, und Tibshirani R (2010). Regularization paths for generalized linear models via coordinate descent, *Journal of Statistical Software*, 33(1), S. 1-22.
- Heeke, G., Heinrich, J., und Maurer, R. (2019). Neue Erkenntnisse zur Ermüdungsfestigkeit von Spannbeton unter sehr hohen Lastwechselzahlen. In: *Beton- und Stahlbetonbau* (114), Heft 4, S. 242-254.
- Heinrich, J. (2017). Ermüdungsverhalten von Spannbetonbauteilen - Untersuchungen unter sehr hohen Lastwechselzahlen. In: *Beiträge zur 5. DAfStb-Jahrestagung mit 58. Forschungskolloquium*, 20./21.09.2017, Kaiserslautern, S. 45-55.
- Heinrich, J. und Maurer, R. (2019). Rissmonitoring zur Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit an bestehenden Brückenbauwerken. In: *Schriftenreihe Konstruktiver Ingenieurbau Dresden – Heft 48*, S. 83-96.
- Heinrich, J., Maurer, R., Lecker, K., Müller, C. H., und Ickstadt, K. (2021). Detektieren ermüdungsbedingter Spannstahlbrüche mittels Rissmonitoring im Versuch und am Bauwerk. In: *Bauingenieur* (96), Heft 3, S. 92-101.

- Kapphahn, G. (1999). Schallemissionsanalyse (SEA) bei experimentellen Tragwerksuntersuchungen. In: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung – DGZfP-Berichtsband 66 CD, S. 251-256.
- Liaw, A. und Wiener, M. (2002). Classification and regression by randomForest. R News 2(3), S. 18-22.
- Müller, C.H. und Denecke, L. (2013). Stochastik in den Ingenieurwissenschaften - Eine Einführung mit R, Springer, Berlin.
- R Development Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, <http://cran.r-project.org/>
- Schacht, G., Käding, M., Bolle, G., und Marx, S. (2019). Konzepte für die Bewertung von Brücken mit Spannungsrisskorrosionsgefahr. In: Beton- und Stahlbetonbau (114), Heft 2 (Sonderdruck), S. 85-94.
- Wedel, W., Käding, M., Marx, S., (2019). Schallemissionsmessungen zur Spanndrahtbruchererkennung. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – Beiträge zur 7. DAfStb-Jahrestagung mit 60. Forschungskolloquium, S. 120-132.
- Wikipedia zu Spektrogramm, <https://de.wikipedia.org/wiki/Spektrogramm>, 18.11.2021.
- <https://CRAN.R-project.org/package=pheatmap>, 18.11.2021.
- <https://CRAN.R-project.org/package=RColorBrewer>, 18.11.2021.



