

# Optimierung von Fugenkonstruktionen – Erfassung realer Beanspruchungen des Fugensystems

FA 8.244

Forschungsstelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Bearbeiter: Spitzer, S. / Wenzel, N. / Pirskawetz, S. / Hoppe, J. / Recknagel, C.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: September 2019

## 1 Einführung

In den letzten Jahren mussten Gebrauchsmängel bei hoch beanspruchten Betonfahrbahndecken, insbesondere im BAB-Netz, aufgrund unbefriedigender Funktionalität und Dauerhaftigkeit der konstruktiven und materialtechnischen Lösungen im Fugenbereich (Fugenkonstruktion; Fugenfüllsysteme) in Kauf genommen werden, die inakzeptable Beeinträchtigungen der Verfügbarkeit nach sich zogen. Dies ist einerseits sicherlich auf die rasante Zunahme des Schwerverkehrs aber auch auf klimatische Beanspruchungen zurückzuführen, die zu einer höheren Belastung der Konstruktion vor allem auch im Fugenbereich zwischen zwei angrenzenden Betonfahrbahnplatten führen. Die Auswirkungen der höheren Beanspruchung auf die Fahrbahnkonstruktion sind jedoch insbesondere für die modernen Betonfahrbahnbeläge nicht quantifiziert. Darüber hinaus wurde ebenfalls deutlich, dass die tatsächlichen Wirkmechanismen der verschiedenartigen innovativen Betonbelagssysteme unter den äußeren Beanspruchungen noch nicht vollständig aufgeklärt sind. Fugenkonstruktionen müssen flexibel, langlebig und robust sein und den Fugenspalt vor dem Eindringen von Wasser, Gestein, Öl und allen, auf einer Betonautobahn anfallenden Substanzen schützen. Sehr häufig sind Gebrauchsreduzierun-

gen von Betonautobahnen auf zuvor mangelhafte Funktionsfähigkeit oder Dauerhaftigkeit von Fugenfüllungen zurückzuführen. Die derzeit angewendeten konstruktiven und materialtechnischen Dimensionierungsgrundsätze von Fugenkonstruktionen wurden auf der Grundlage von sporadischen Untersuchungen aufgestellt, die den Wissensstand und die Technologie der Siebzigerjahre des vorherigen Jahrhunderts widerspiegeln. Insbesondere die Quantifizierung der aufzunehmenden Formänderungen/Bewegungen im Fugenbereich – und damit die Anforderungen an die kinematische Flexibilität der Fugenkonstruktion und der darin angeordneten Fugenfüllung – erfolgte überwiegend durch Abschätzungen oder auf der Basis von indirekten Messungen, die weder in der Hauptbeanspruchungsachse noch präzise oder dynamisch genug waren, um die realen Bewegungen der Fugenflanken bei überrollendem Schwerverkehr erfassen zu können. Die Übertragbarkeit oder Extrapolation vom damaligen Niveau der SV-Beanspruchung auf die mittlerweile vorherrschenden Betonfahrbahntechnologien ist ebenfalls nicht möglich. Für eine zielführende gebrauchsorientierte Optimierung der Fugenkonstruktion und Fugenfüllung auf Basis einer wissenschaftlichen Lösungsmethodik ist es deshalb zunächst notwendige Voraussetzung, eine aktuelle Datenlage über reale Beanspruchungsszenarien zu erschaffen.

Im Ergebnis des Forschungsvorhabens soll ein Sensor-, Mess-, Datenübertragungs- und Datenverarbeitungssystem entwickelt werden, das unter den Bedingungen der Straßenbaupraxis relevante Daten über mechanische und klimatische Beanspruchungszustände hochbeanspruchter Betonautobahnen weitestgehend automatisiert zur Verfügung stellen kann. In Bild 1 ist der Lösungsansatz zur Erfassung realer Beanspruchungen von Fugenkonstruktionen in Betonautobahnen dargestellt.

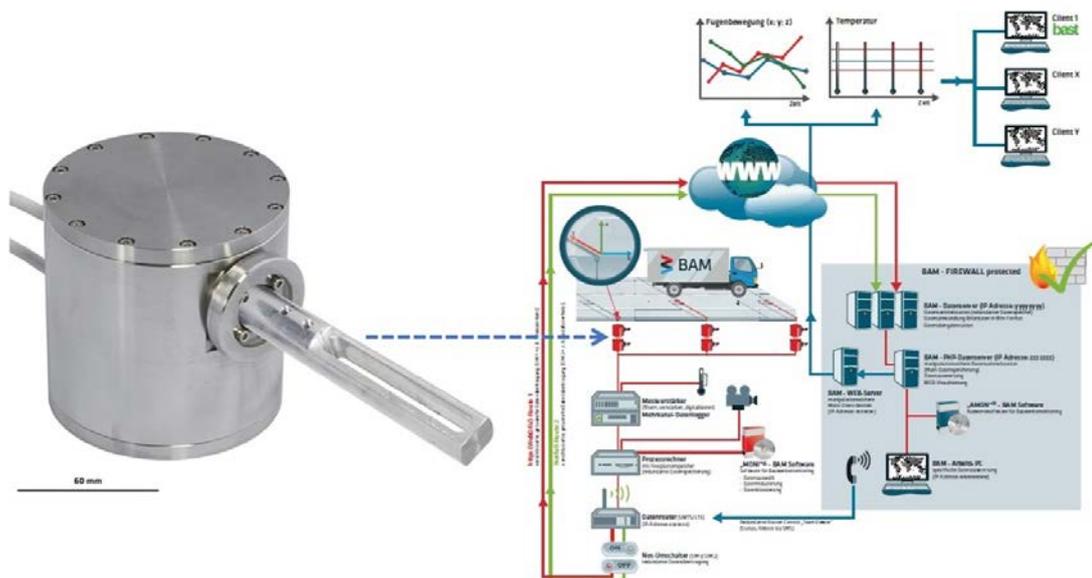


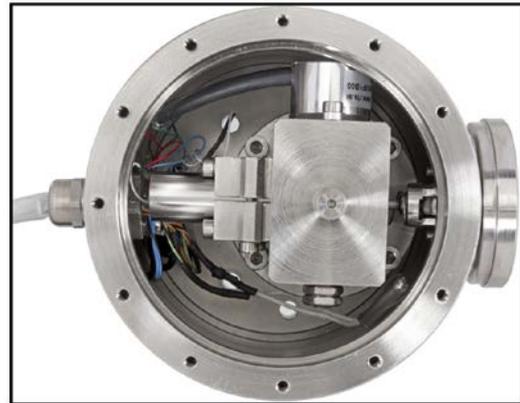
Bild 1: Sensor und schematische Darstellung der Aufgabenlösung (Lösungsansatz)

## 2 Entwicklung eines innovativen Sensorsystems

Das für diesen Zweck entwickelte innovative Sensorsystem kann direkt in die Rollspur eingebaut und mit Lkw überfahren werden und ist schnell und präzise genug, um die realen Relativbewegungen angrenzender Fahrbahnplatten im Fugenbereich in allen drei Raumachsen in Echtzeit zu erfassen. Die Kennzeichnung der Leistungsfähigkeit und Ermittlung der Kenndaten erfolgte in einem mehrstufigen Validierungsprozess. Zunächst wurden umfangreiche Eingangsuntersuchungen an den Einzelsensoren durchgeführt. Anschließend erfolgten Kalibrierungen und mehrstufige Untersuchungen am kombinierten Sensorsystem im Labormaßstab unter Berücksichtigung der Einsatzbedingungen (Temperatur; dynamische Anregung). Die Erprobungs- und Validierungsmethodik wurde mit der Phase der Felderprobung über insgesamt zwölf Monate abgeschlossen. Die Haupteigenschaften lassen sich verkürzt darstellen in:

- einer dreiaxialen Messmöglichkeit mit achsenbezogenen Messbereichen von  $\pm 5$  mm (x-Achse) beziehungsweise  $\pm 2$  mm (y- beziehungsweise z-Achse),
- einer Messfrequenz von bis zu 2000 Hz für quasi-statische (saisonale) und dynamisch induzierte Fugenbewegungen,
- einer Auflösung der Messdaten von bis zu einem Mikrometer,
- einer Genauigkeit der Sensorwerte von  $< 10$   $\mu\text{m}$  (x-Achse) beziehungsweise  $< 20$   $\mu\text{m}$  (y- und z-Achse) im Arbeitsbereich  $-20$  bis  $+50$   $^{\circ}\text{C}$ ,
- einer Sensor-Umhausung, die der direkten Überrollung durch Lkw sowie allen chemischen, klimatischen und sonstigen Beanspruchungen unter straßenbaupraktischen und verkehrspraktischen Beanspruchungen im BAB-Netz über einen längeren Zeitraum ( $> 1$  Jahr) standhält,
- optimierte Einbau- und Ausbautechnologie und

- Wiederverwendbarkeit nach Ende der spezifischen Messkampagne.



**Bild 2:** Das empfindliche Innere des Sensorsystems, geschützt durch ein widerstandsfähiges Gehäuse aus V4a-Stahl

Nur durch innovative Kombination von verschiedenen hochgenauen Einzelsensoren, Messtechniken, hochbeanspruchbaren Materialien und neu entwickelter Datenauswertung konnten alle Anforderungen erfüllt werden.

## 3 Installation und Belastungsszenarien

Zwischen dem 20. und 22. März 2018 konnten vier Sensorsysteme auf einem Test-Areal in der Nähe von Köln, dem sogenannten duraBAST, installiert werden. Dabei konnte die vorbereitete Einbautechnologie erfolgreich erprobt werden. Als Testfeld wurde eine Waschbetonstrecke mit Betonplattendimensionen von  $5$  m x  $4,25$  m x  $0,23$  m auf einer Asphalt-Tragschicht ausgewählt.

Zwei weitere Sensorsysteme wurden ein halbes Jahr später am 13. und 14. August 2018 auf demselben Testareal, jedoch auf einem anderen Testfeld mit Betonfertigteilen ( $2,5$  m x  $4,25$  m x  $0,24$  m) auf einer Schottertragschicht, installiert.

Die Belastungsszenarien sind in Tabelle 1 aufgeführt:

**Tabelle 1: Belastungsszenarien**

<b>Waschbetonstrecke 40 auf dem duraBAST</b>			
<b>Szenario</b>	<b>Belastung [t]</b>	<b>Anzahl d. Überrollungen</b>	<b>Datum</b>
Kleintransporter, gleichförmige Überrollung	1,5 und 2	5	23. März 2018
Lkw, gleichförmige Überrollung	7,3 und 12,1	12	12. April 2018
Lkw, Gefahrenbremsung	7,3 und 12,1	2	12. April 2018
Falling Weight Deflectometer	5, 7,5 und 10	180	12. April 2018
Lkw, gleichförmige Überrollung	6,8 und 12,7	18	10. Juni 2018
Lkw, Gefahrenbremsung	6,8 und 12,7	3	10. Juni 2018
klimatische Langzeitbeanspruchung	keine	-	23. März 2018 bis 6. Mai 2019
<b>Fertigteilbetonstrecke auf dem duraBAST</b>			
Mobile Belastungssimulation (MLS)	5	100 000	15./16. August 2018
MLS, gleichförmige Überrollung	20	1	16. August 2018
MLS	5	75 000	6./7. November 2018
klimatische Langzeitbeanspruchung und MLS	5	100 000	14. August bis 7. November 2018, immer noch vor Ort

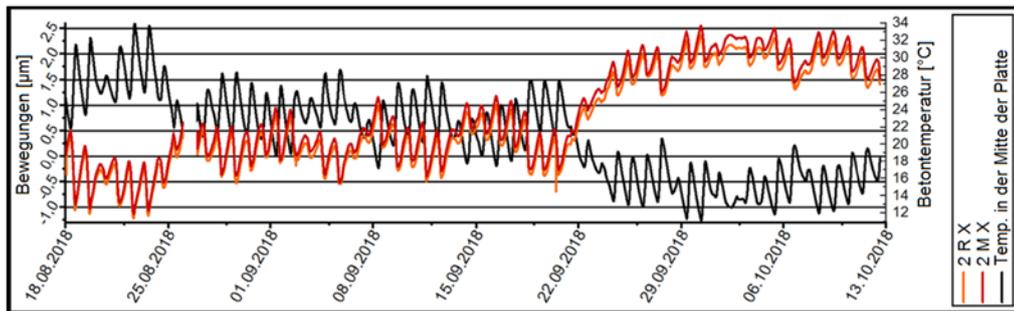
#### 4 Ergebnisse und Diskussion

Im Abschlussbericht sind die Ergebnisse der mehrstufigen Kontroll-, Kalibrier- und Validierungsphasen zum Nachweis der zielführenden anforderungsgerechten Leistungsfähigkeit ausführlich aufgeführt und diskutiert. In dem Kurzbericht werden in stark verkürzter Form die wesentlichen Ergebnisse der Felderprobungsphase zusammengefasst.

Das neu entwickelte Sensorsystem zusammen mit der innovativen Steuerung und Datenverarbeitung/Datenübertragung wurde

mithilfe einer praxismgerechten Ein- und Ausbautechnologie erfolgreich im Feldversuch erprobt. Es erwies sich als flexibel montier- und umrüstbar und über den Erprobungszeitraum hinweg als dauerhaft, selbst unter ungünstigen Witterungsbedingungen. Die entwickelten Sensorsysteme sind präzise genug, um durch Schwerlastverkehr induzierte, schnell ablaufende kleine Bewegungen der Fugenflanken detektieren zu können und haben einen Messbereich, der groß genug ist, um tageszeitliche und saisonal langsam ablaufende Bewegungen hochgenau zu erfassen.

##### 4.1 Thermisch induzierte saisonale Bewegungen



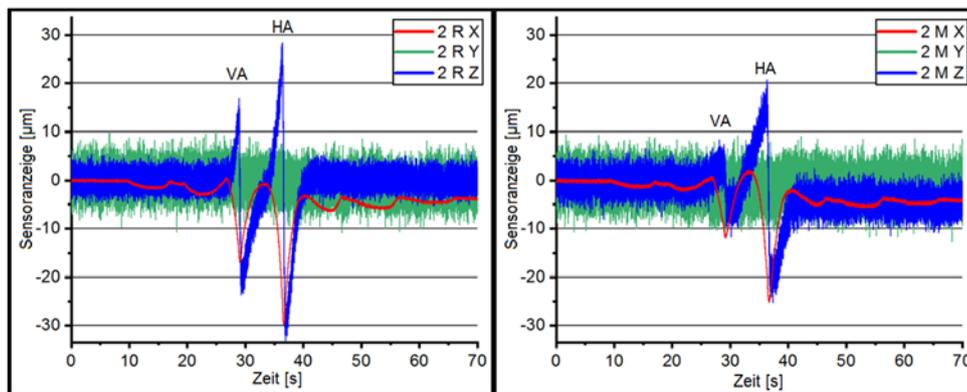
**Bild 3: Saisonale Bewegungen der Fugenflanken in x-Richtung aus thermisch bedingter Ausdehnung der Betonfahrbahnplatten**

In Bild 3 sind die spezifischen saisonalen Bewegungen in x-Richtung sowie die Temperatur in der Mitte einer Betonplatte in 135 mm Tiefe abgebildet. In dieser Messperiode fand auf der Versuchsstrecke keine mechanische Beanspruchung durch überrollenden Verkehr statt. Die für die y- beziehungsweise z-Achse aufgenommenen Messwerte zeigen keine signifikanten Bewegungen an. Alle Sensorwerte zeigen hervorragende Übereinstimmung und sind – auch in lokalen Bereichen (Tagesverlauf) – deutlich temperaturinduziert. Aus den Daten sind Rückschlüsse zur Wirkung der Tragschicht beziehungsweise des konstruktiven Deckenaufbaus auf das Verformungsverhalten im Fugenbereich abzuleiten. Aus dem Messwertverlauf der in Bild 3 dargestellten relativen Fugenbewegungen konnte bei dieser instrumentierten Fuge planmäßige Funktionalität detektiert werden. Wenn die Temperatur steigt, wird die Fugenkammer zusammengedrückt, wenn die Temperatur fällt, wird die Fugenkonstruktion auseinandergezogen. Andere instrumentier-

te Fugen zeigten deutlich abweichendes Verhalten, welches durch Deformationsbehinderungen erklärt werden konnte. Insgesamt wurde lokal unterschiedliches Deformationsverhalten der Betondecke festgestellt, was Fragen bezüglich der aktuellen Bewertung des Deformationsverhaltens moderner Fahrbahndecken aus Beton aufwirft.

##### 4.2 Verkehrsinduzierte Bewegungen durch Lkw (20 t)

In Bild 4 sind exemplarisch die Bewegungen der Fugenflanken in allen drei Messachsen von zwei nebeneinanderliegenden Sensorsystemen an der gleichen Fuge während einer Überrollung mit einem Lkw dargestellt. Auf der linken Seite sind die Bewegungen eines direkt überrollten Sensorsystems (R = Rollspur) zu sehen, auf der rechten Seite die Bewegungen eines Sensorsystems in Plattenmitte.

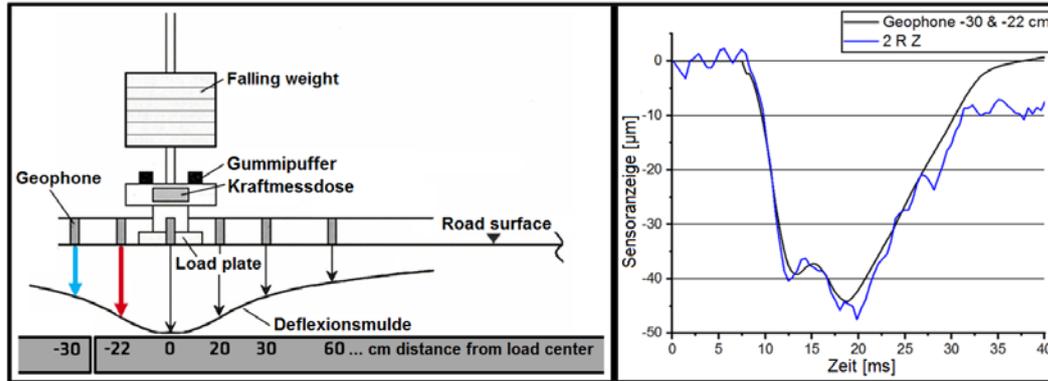


**Bild 4: Sensoranzeigen beziehungsweise Bewegungen der Fugenflanken während einer Überrollung mit einem Lkw bei einer Geschwindigkeit von 2 km/h; Gesamtlast: 20 t; VA = Vorderachse (7,3 t) HA = Hinterachse (12,1 t)**

Die z-Achse detektiert Bewegungen von 33 µm bei Überfahrt mit der Vorderachse (7,3 t) und 54 µm bei Überfahrt mit der Hinterachse (12,1 t, jeweils peak-to-peak). Das Sensorsystem in der Mitte der Betonplatte zwischen beiden Rollspuren (M) zeigt im Vergleich zu den direkt in der Rollspur (R) aufgenom-

menen Werten kleinere Bewegungen an (Vorderachse: 8 µm, Hinterachse: 36 µm). Daher ist es für zukünftige Untersuchungen wichtig, direkt in der Rollspur zu messen, sofern die maximalen Verformungen erfasst werden sollen.

### 4.3 Bewegungen während Beanspruchungen mit einem Falling Weight Deflectometer (10 t)

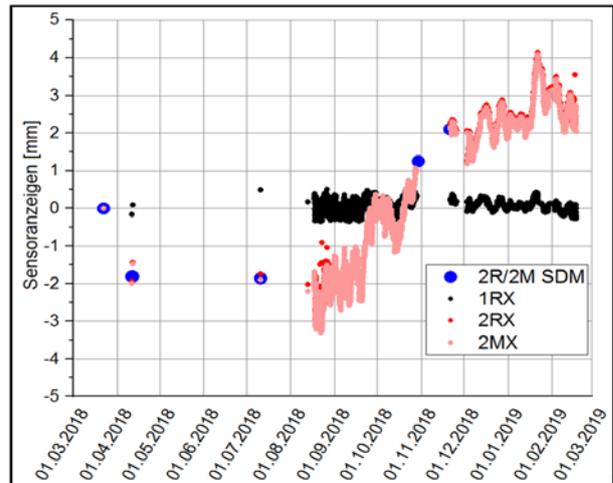


**Bild 5:** Beschreibung der Falling Weight Deflectometry (FWD) und Sensoranzeigen eines entwickelten Sensorsystems im Vergleich mit den Anzeigen der Geophone, die an der Fugenflanke anliegen

In Bild 5 (links) ist das Funktionsschema des Falling Weight Deflectometer (FWD) dargestellt. Dabei handelt es sich um ein eingeführtes Impaktverfahren für verschiedene Analysen von Böden beziehungsweise Fahrbahnen. Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden die Untersuchungen vergleichend eingesetzt, um die vertikalen Bewegungen der Fugenflanken beziehungsweise die Sensoranzeigen in z-Achse zu validieren. Diese Untersuchung ist Bestandteil des mehrstufigen Validierungskonzeptes des Sensorsystems. In Bild 5 (rechte Seite) sind die beiden Verläufe der verschiedenen Messsysteme dargestellt, die Abweichungen sind mit unter 3 µm sehr klein.

zwölf Monaten standgehalten. Im Ergebnis der Felderprobung wurden konstruktive und fertigungstechnische Detailverbesserungen identifiziert.

Das Ergebnis dieser Untersuchungen im Feld bestätigt, dass die Sensorsysteme schnell, präzise und genau genug sind, um auch die kleinsten und schnellsten Relativbewegungen von Fugenflanken validiert detektieren zu können.



**Bild 6:** Saisonale Verformungen der Fugenkammer in Fahrtrichtung über die Gesamtmessdauer von über einem Jahr mit validierender Setzdehnungsmessung (SDM)

## 5 Zusammenfassung

Mit dem innovativen Sensorsystem ist es das erste Mal möglich, reale Fugenbewegungen in allen drei Raumrichtungen in Echtzeit mit einer Auflösung von bis zu einem Mikrometer und Genauigkeiten unterhalb 20 µm zu erfassen. Das Sensorsystem ist an eine Steuerungs- und Datenverarbeitungseinheit angeschlossen, welche die Messdaten automatisch auf einem Mess-PC vor Ort vorauswertet, speichert und verschlüsselt via Internet an die BAM sendet. Die Labor- und Felderprobung des kompletten technischen Lösungsansatzes gemäß Bild 1 verlief erfolgreich.

In Bild 6 sind die saisonalen Verformungen von zwei verschiedenen Fugenkammern in x-Achsen-Richtung dargestellt. Bei einer kleinen Kerbrissausbildung von 0,25 mm, wie es bei der Fugenkammer mit dem Sensorsystem 1R der Fall ist, sind nur kleine jahreszeitliche Verformungen von ± 0,4 mm erkennbar. Bei einer breiten Kerbrissausbildung von 3,2 mm (Fugenkammer mit Sensorsystem 2R und 2M) konnten Bewegungen von bis zu 7 mm gemessen werden. Fugenkonstruktionen sind für eine Bewegung von 30 % des Nullzustands ausgelegt, bei einer 10-mm-Fugenkammer übersteigen die gemessenen Werte dies um mehr als das Doppelte. Bereits aus diesen punktuellen Untersuchungsergebnissen lässt sich der Bedarf nach Überar-

Weiterhin haben die Sensorsysteme in verschiedenen Betonstraßenkonstruktionen den klimatischen Beanspruchungen wie Regen, Schnee, stehendem Wasser, Temperaturen von bis zu 35 und -5 °C, verschiedenen Belastungsszenarien wie Überrollungen von Pkw (1,7 t), Kleintransportern (3,5 t), Lkw (20 t) und einem mobilen Belastungssimulator mit einer Achslast von 20 t und einer Gesamtlast von 40 t über die Erprobungsdauer von

beutung der bisherigen Dimensionierungsregelungen für Fugen in hochbeanspruchten Betonfahrbahndecken ableiten.

## 6 Ausblick

Die mit dem Sensorsystem detektierbaren Formänderungen im Fugenbereich moderner innovativer Betondecken können nicht nur helfen, das Verständnis vom Funktionsverhalten derartiger Fahrbahnbeläge zu verbessern, sondern liefern auch die Grundlage für eine performance-basierte Untersuchung, Bewertung und Weiterentwicklung von Fugenfüllsystemen in Betonfahrbahndecken. Durch eine weiterführende repräsentative Datenerhebung, -fusion und -analyse können konstruktive und materialtechnische Beiträge zum Verformungsverhalten aufgeklärt werden. Darüber hinaus werden die messtechnischen Hilfsmittel bereitgestellt, um Lebensdauerzyklen oder Instandsetzungszyklen besser planen zu können.