

# Normierte Reichweite $R_{200}$ für E-Bikes

Stand: 7.8.2018

## 1 Sache

„Wie weit komme ich mit meinem E-Bike?“ Für viele Interessenten ist die Reichweite eine zentrale Frage und ein entscheidendes Kriterium beim E-Bike-Kauf. Bisher gab es verschiedene Ansätze, diese zu ermitteln, jedoch ließen sich die Verfahren nur sehr eingeschränkt vergleichen und reproduzieren. Der Zweirad-Industrie-Verband (ZIV) hat daher den „Normierten Reichweitentest  $R_{200}$ “ entwickelt. Auf dieser Grundlage lassen sich für Hersteller, Händler und Endkunden die Reichweiten von verschiedenen E-Bikes objektiv miteinander vergleichen.

Das neue Verfahren kann auf qualifizierten Prüfständen durchgeführt werden und zeichnet sich insbesondere durch reproduzierbare Ergebnisse aus. Relevante Einflussgrößen sind beispielsweise die Batterie, das Antriebssystem, der Antriebsstrang und die Bereifung des E-Bikes. Zudem hängt die Reichweite eines E-Bikes sehr stark vom gewählten Unterstützungsmodus ab (z.B. Eco, Sport, Turbo). Um die Ergebnisse trotzdem vergleichbar zu machen, werden in dem neuen Verfahren alle E-Bikes auf einen einheitlichen Unterstützungsfaktor von 200 Prozent normiert (daher „ $R_{200}$ “). 200 Prozent Unterstützungsfaktor bedeutet hier, dass das Antriebssystem des E-Bikes bei einer Fahrerleistung von 70W zusätzlich mit 140W unterstützt. Darüber hinaus werden beim „Normierten Reichweitentest  $R_{200}$ “ die Batteriekapazität und der Energieverbrauch des E-Bikes ausgewiesen.

Im Fall von E-Mountainbikes sind oft die erreichten Höhenmeter interessant. Zur Ermittlung der Höhenmeter wäre ein separater Test zu definieren. Dieses Thema wird hier nicht behandelt.

## 2 Aufgabe

Definition eines Reichweitentests mit folgenden Eigenschaften:

- ▶ Ergebnis ist reproduzierbar (→ Ermittlung auf Prüfstand)
- ▶ Ergebnis ist unabhängig von der maximalen Leistung des Antriebs (→ Normierung  $R_{200}$ )
- ▶ Ergebnis ist unabhängig vom verwendeten Prüfstand (Prüfstand muss geeignet sein, s.u.)
- ▶ Mit dem Ergebnis kann der Kunde verschiedene Fahrräder inkl. Antrieb/Antriebsstrang/Reifen usw. miteinander vergleichen
- ▶ Das Ergebnis ist für den Kunden intuitiv und leicht verständlich (d.h. Angabe der Reichweite in km)
- ▶ Das Ergebnis soll plausibel und realistisch sein
- ▶ Das Ergebnis ist die Reichweite des kompletten Fahrrads

### 3 Typische Bedingungen

Die Reichweite  $R_{200}$  in km ergibt sich aus dem in Kapitel 4 ff beschriebenen Prüfstandsverfahren. Dieser Wert wird auch im Feld unter den folgenden typischen Bedingungen erreicht.

- Unterstützungsfaktor: 200%  
(200% entspricht in der Regel einem mittleren bis hohen Unterstützungsfaktor, siehe z.B. Bedienungsanleitung des Antriebssystems)
- Gesamtgewicht (Fahrer + E-Bike + Gepäck): 100kg
- $\emptyset$ -Geschwindigkeit: 20km/h
- $\emptyset$ -Trittfrequenz Fahrer: 60 rpm
- $\emptyset$ -Trittleistung Fahrer: 70 W
- Sitzhaltung: Tourenrad
- Geländeart: hügelig
- Untergrund: Asphalt-Straße mit schlechter Qualität
- Anfahrhäufigkeit: mittel
- Windbedingungen: leicht windig
- Fahrrad-Licht: nicht eingeschaltet
- Fahrradzustand: neuwertig (Batterie, Antriebsstrang)

## 4 Messablauf

### 4.1 Parameter

- ▶ höchste Unterstützungsstufe
- ▶ ohne Rekuperation
- ▶ maximaler Reifendruck laut Herstellerangabe
- ▶ Temperatur (23+/-5)°C
- ▶ Fahrtwindkühlung bis max. 3 Meter pro Sekunde zulässig
- ▶ Radaufstandskraft: 500N (siehe Kapitel 7)
- ▶ Trittfrequenz: (60+/-8) rpm (Toleranz aufgrund diskreter Gangwahl)
- ▶ Fahrerleistung: (70+/-2) Watt (Durchschnitt über die komplette Messung), geregelt  
Eine sinusförmige Fahrerleistung ist erlaubt, arithmetischer Mittelwert: 70W
- ▶ Geschwindigkeit: (20+/-1) km/h geregelt
- ▶ Fahrradlicht: ausgeschaltet

### 4.2 Vorbereitung der Messung

- ▶ Unmittelbar vor der Reichweitenmessung muss eine Warmlaufphase des Prüfstands erfolgen: E-Bike-System ausgeschaltet, Betrieb von Prüfstand und Fahrrad mittels 70 W Fahrerleistung, im Arbeitspunkt 20 km/h, Zeit: 30 Minuten

### 4.3 Messungen

#### 4.3.1 Messung der Prüfstandsverluste

- ▶ Bestimmung der Prüfstandsverluste (siehe Kapitel 8), Ermittlung der entsprechenden Bremskraft  $F_{B, comp}$

#### 4.3.2 Messung der Daten zur Bestimmung der Reichweite $R_{200}$

- ▶ Parameter: siehe Kapitel 4.1
- ▶ Ermittlung der mittleren Bremskraft  $F_{B, measured}$  der Bremsrolle über die gesamte Prüfzeit
- ▶ Ermittlung der Prüfstands-Reichweite  $R_p$  bis Abschaltung des Antriebs
- ▶ Abschaltkriterium: mechanische Leistung Antrieb <40 Watt

### 4.3.3 Auswertung und Angabe der Ergebnisse

- ▶ Normierung (Berechnung: siehe Kapitel 5, Hintergrundinfo: siehe Kapitel 9)  
Die Prüfstandsreichweite  $R_P$  wird über einen Faktor  $K$  normiert, der die Leistung des Antriebs berücksichtigt. Zusätzlich berücksichtigt dieser Faktor  $K$ , dass in Realität im Gegensatz zum Prüfstand nicht nur mit Motorunterstützung gefahren wird sondern auch ohne (z.B. Bergabfahrt). Auf dem Prüfstand wird eine konstante Bergauffahrt simuliert. Die Steigung der Bergauffahrt ist umso größer, je größer die Bremskraft ist. Der Faktor  $K$  hängt ab von der ermittelten Bremskraft auf dem Prüfstand. Es wird eine Formel zur Berechnung von  $K$  zur Verfügung gestellt (siehe Kapitel 5). Endergebnis ist die normierte Reichweite  $R_{200}$  in km.
- ▶ Zusätzlich zu  $R_{200}$  wird die Batteriekapazität in Wh angegeben und der Energieverbrauch des E-Bikes in Wh/km
- ▶ Beispiel für die Angaben:

**Reichweite  $R_{200} = 70\text{km}$**

Batteriekapazität: 500Wh

Energieverbrauch: 7,14 Wh/km

$R_{200}$  ist die normierte Reichweite des E-Bikes  
bei 200% Unterstützung des Antriebs

## 5 Berechnung der normierten Reichweite $R_{200}$

Berechnung:

$$R_{200} = K * R_P$$

$R_P$ : auf dem Prüfstand gemessene Reichweite

K kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$K = 0,05 [1/N] * (F_{B, \text{measured}} - F_{B, \text{comp}}) - 0,55 \quad (1)$$

$F_{B, \text{measured}}$ : gemessene Bremskraft an der Bremsrolle, ohne Kompensation der Prüfstandsverluste

$F_{B, \text{comp}}$ : Bremskraft, die durch die Prüfstandsverluste erzeugt wird (negativer Wert)

Herleitung der Formel: siehe Kapitel 9

Damit ergibt sich für  $R_{200}$ :

$$R_{200} = (0,05 [1/N] * (F_{B, \text{measured}} - F_{B, \text{comp}}) - 0,55) * R_P \quad (2)$$

K ist dimensionslos, daher muss zur Berechnung von (1) und (2)  $F_B$  in der Einheit [N] eingesetzt werden.

## 6 Prüfstand

Anforderungen an den Prüfstand:

- ▶ Drehzahlgeregelte Bremsrolle unter dem angetriebenen Rad
- ▶ Drehmomentgeregelte Stimulation an der Pedalachse, sinusförmig (Einspeisung der Fahrerleistung)
- ▶ Möglichkeit der Ermittlung der Prüfstandsverluste (Verfahren: siehe unten)
- ▶ Regelung des Prüfstands erlaubt einen stabilen Arbeitspunkt von  $(20 \pm 1)$  km/h. Prüfstand gerät nicht in Schwingung in Bezug auf die Geschwindigkeit.
- ▶ Reproduzierbarkeit der Messungen am Prüfstand (Streuung der Messwerte bei 3 Messungen kleiner 1%, Messungen jeweils mit Demontage und erneuter Montage des Prüflings auf dem Prüfstand)

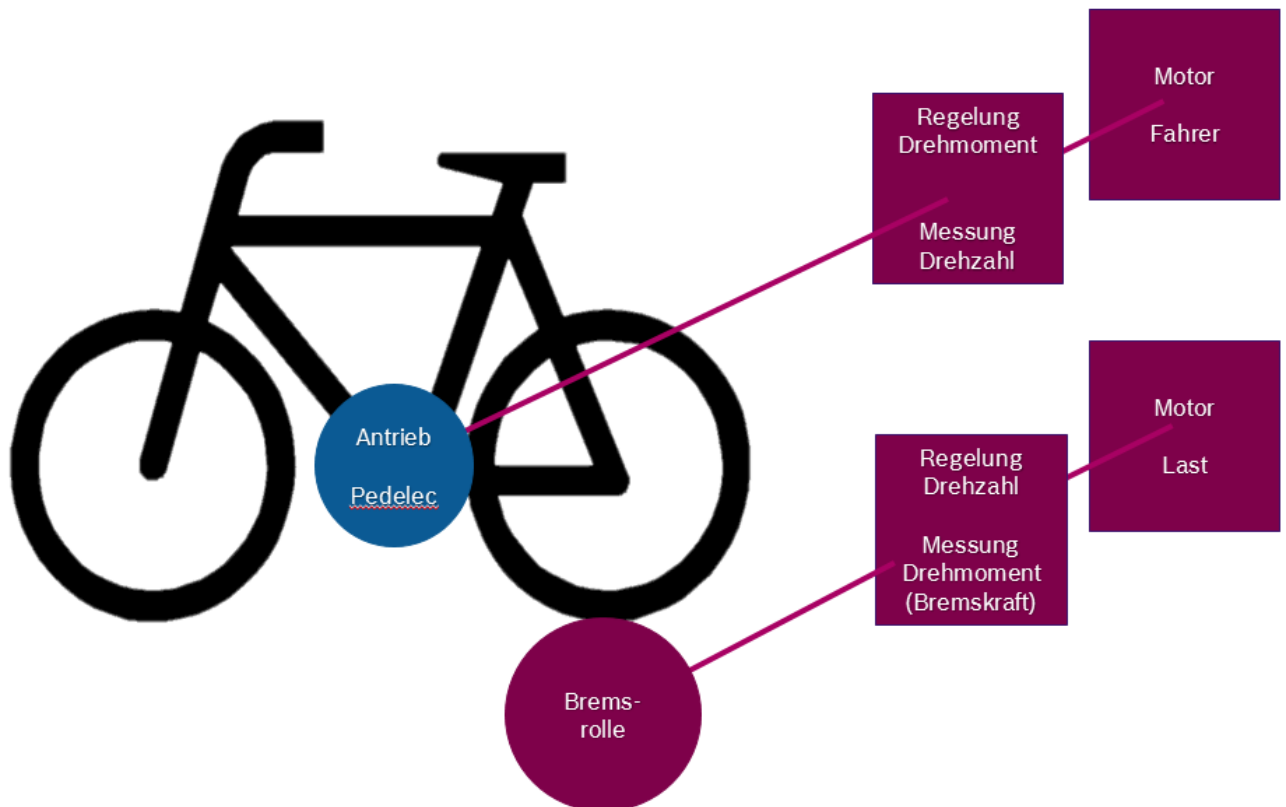


Abbildung 1: Messaufbau

## 7 Definition der Radaufstandskraft $F_R$

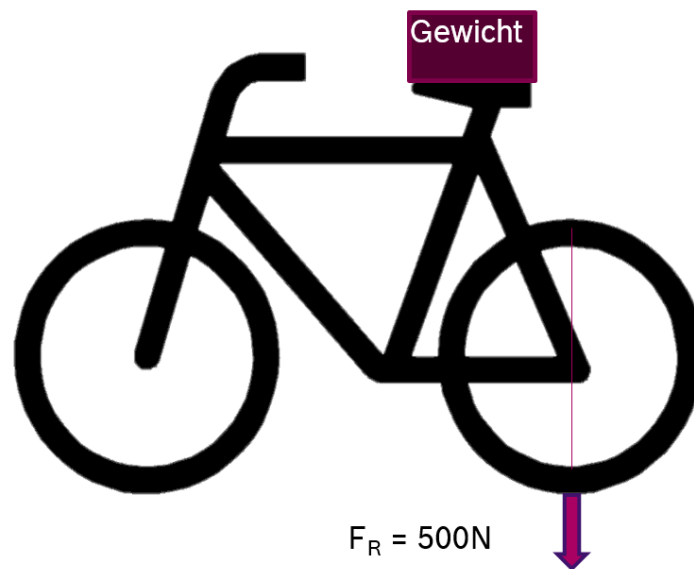


Abbildung 2: Definition der Radaufstandskraft  $F_R$

## 8 Berücksichtigung der Prüfstandsverluste

### 8.1 Ermittlung der Verluste

Die Verluste werden einmalig mit einem Referenzfahrrad mit Referenzreifen (z.B. Schwalbe Kojak oder Continental Grand Prix 4000 S2) ermittelt. Das Referenzfahrrad kann ein Fahrrad ohne elektrisches Antriebssystem sein. Das Rad auf der Bremsrolle darf keinen Dynamo, Nabenmotor o.ä. enthalten, da diese Einflüsse nicht kompensiert werden sollen.

Verfahren:

Fahrradmontage auf dem Prüfstand, Radaufstandskraft: 500N

Die Bremsrolle wird aktiv angetrieben. Antriebsstrang (Kette, Riemen) und E-Bike-Antrieb des Fahrrads sind nicht in Bewegung. Die Leistung  $P_{\text{comp}}$  der Bremsrolle wird bei Geschwindigkeiten von 15km/h bis 25 km/h in Schritten von 1km/h ermittelt. Daraus wird die entsprechende Bremskraft  $F_{B, \text{comp}}$  errechnet.

Formel

$$F = P / (2\pi \cdot n \cdot r)$$

P: Leistung

n: Drehzahl

r: Radius Bremsrolle

Wie bei der Messung muss auch unmittelbar vor der Ermittlung der Prüfstandsverluste eine 30-minütige Warmlaufphase des Prüfstands erfolgen.

### 8.2 Kompensation

Zur Kompensation der Prüfstandsverluste wird die Bremskraft  $F_{B, \text{comp}}$  von der am Prüfstand gemessenen Bremskraft  $F_{B, \text{measured}}$  subtrahiert, siehe auch Gleichung (4) in Kapitel 9:

$$F_B = F_{B, \text{measured}} - F_{B, \text{comp}}$$

$F_B$ : Bremskraft an Bremsrolle, kompensiert um die Verluste des Prüfstands

$F_{B, \text{comp}}$  ist negativ, daher ist  $F_B$  größer als  $F_{B, \text{measured}}$ .

### 8.3 Häufigkeit der Ermittlung der Verluste

Die angemessene Häufigkeit der Ermittlung der Prüfstandsverluste hängt ab von der Mess-Stabilität des Prüfstands. Optimal ist, wenn die Kompensation vor jeder Messung ermittelt wird. Wenn nachgewiesen werden kann, dass der Prüfstand eine gute Mess-Stabilität hat (Schwankung der Verluste <1%), dann kann die Häufigkeit der Ermittlung der Prüfstandsverluste reduziert werden.

Nach Änderungen am Prüfstand (z.B. Austausch von Lagern, SW-Änderung) müssen die Prüfstandsverluste erneut ermittelt werden.

Mit den bis Kapitel 8 beschriebenen Vorgaben kann der normierte Reichweitentest durchgeführt und die normierte Reichweite  $R_{200}$  berechnet werden.

Die Ausführungen in Kapitel 9 sind Hintergrundinformationen zur physikalischen Herleitung der Normierung.



## 9 Hintergrundinfo zur Berechnung der normierten Reichweite $R_{200}$

Die Berechnung der normierten Reichweite  $R_{200}$  geschieht in 2 Schritten:

### 9.1 Normierung aller Antriebe auf 200% Unterstützungsfaktor

Stärkere Antriebe haben auf dem Prüfstand höhere Bremskraft, erreichen aber kleinere Reichweiten. D.h. stärkere Antriebe werden benachteiligt.

Lösung: Normierung der Reichweite auf einheitlichen Unterstützungsfaktor 200%:  $R_{P200}$

Dazu wird die auf dem Prüfstand ermittelte Reichweite mit dem Normierungsfaktor  $N$  multipliziert:

$$R_{P200} = N * R_P \quad (3)$$

$R_{P200}$ : „Prüfstandsreichweite“ bei 200% Unterstützung des Antriebs

$N$ : Normierungsfaktor für die Berechnung der Reichweite  $R_{P200}$   
( $N$ : dimensionslos)

$R_P$ : auf Prüfstand gemessene Reichweite bei maximaler Unterstützung

#### 9.1.1 Ermittlung des Normierungsfaktors $N$

Für die an der Bremsrolle geleistete mechanische Arbeit  $W$  gilt:

$$W = F_B * R_P$$

$$R_P \sim 1 / F_B$$

$$R_P = W * 1 / F_B$$

$F_B$ : Bremskraft an Bremsrolle, kompensiert um die Verluste des Prüfstands

$$F_B = F_{B, \text{measured}} - F_{B, \text{comp}} \quad (4)$$

Misst man die Reichweiten  $R_P$  am Prüfstand bei verschiedenen Unterstützungsfaktoren (bei Bosch z.B. Eco, Tour, Sport, Turbo) und trägt diese gegenüber dem Kehrwert der entsprechenden Bremskräfte  $F_B$  auf, so ergibt sich eine Gerade mit der Steigung  $W$  durch den Nullpunkt (siehe Abbildung 3 unten).

$$R_P = W * 1 / F_B \quad (5)$$

Die Steigung  $W$  ist proportional zur Batteriekapazität (doppelte Batteriekapazität ergibt doppelte Reichweite bei gleicher Bremskraft).

## Reichweite $R_P$ über Kehrwert der Bremskraft Prinzipdarstellung

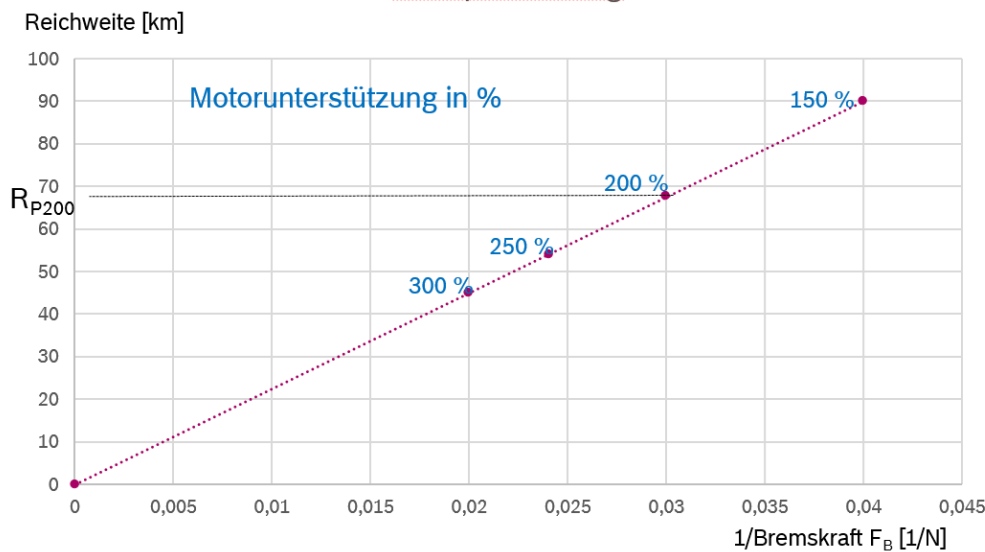


Abbildung 3: Reichweite über Kehrwert der Bremskraft

Der lineare Zusammenhang zwischen Reichweite des E-Bikes und dem Kehrwert der Bremskraft gilt nur, wenn die Fahrerleistung gleich Null ist. Bei Fahrerleistungen  $>$  Null steigt die Reichweite bei kleinen Unterstützungsfaktoren überproportional an. Beim Extrembeispiel wird dies klar: Wenn der Unterstützungsfaktor gegen Null geht, dann geht die Reichweite bei Fahrerleistung  $>$  Null gegen Unendlich. D.h. die Reichweite wird nur noch über die Fahrerleistung erzielt und nicht über die elektrische Leistung des E-Bikes.

Daher muss die Bremskraft, die zur Normierung herangezogen wird um den Anteil der Bremskraft  $F_D$  (D für Driver), die durch die Fahrerleistung erzeugt wird, korrigiert werden.

Aus (5) wird damit:

$$R_P = W * 1 / (F_B - F_D) \quad (6)$$

Aus (3) folgt:

$$N = R_{P200} / R_P \quad (7)$$

ersetzt man gemäß (6):  $R_P = W * 1 / (F_B - F_D)$

$$R_{P200} = W * 1 / (F_{B200} - F_D)$$

$F_{B200}$ : Bremskraft bei 200% Unterstützung

$F_D$ : Anteil der Bremskraft die durch die Fahrerleistung erzeugt wird (D für „Driver“)

so erhält man aus (7):

$$N = (F_B - F_D) / (F_{B200} - F_D) \quad (8)$$

Die Bremskraft  $F_{B200}$  bei 200% Unterstützung ist 3 mal so groß wie der Anteil der Bremskraft  $F_D$ , die durch die Fahrerleistung erzeugt wird:

$$F_{B200} = 3 * F_D$$

Aus (8) wird damit:

$$N = \frac{1}{2} (F_B/F_D - 1) \quad (9)$$

$N = 1$  bei 200% Unterstützung

$N > 1$  bei Unterstützungen größer 200%

$N < 1$  bei Unterstützungen kleiner 200%

## 9.2 Realitätsfaktor R

Auf dem Prüfstand wird über die Bremskraft  $F_B$  konstant eine Bergfahrt simuliert, d.h. es geht konstant bergauf. In der Realität fährt man auch bergab oder in der Ebene. Daher wird  $R_{P200}$  mit dem Faktor R multipliziert. Ergebnis ist die Reichweite  $R_{200}$ .

Der Faktor R wird so gewählt, dass sich die Reichweite  $R_{200}$  im Mittel bei typischen Bedingungen auch im Feld gemäß Kapitel 3 ergibt (Trekkingrad, 100kg Gesamtgewicht, hügelig, ...). Durch diese Wahl ergibt sich eine für den Endverbraucher plausible Reichweite.

$$R_{200} = R_{P200} * R$$

## 9.3 Gesamtfaktor K

Der Normierungsfaktor N und der Realitätsfaktor R werden im Faktor K zusammengefasst.

$$K = R * N$$

Mit N aus Gleichung (9) erhält man

$$K = R * \frac{1}{2} (F_B/F_D - 1)$$

In Messungen wurde  $F_D=11N$  und  $R=1,1$  ermittelt.

Rechnerische Abschätzung für  $F_D$ :  $F_D=P'/v$

Fahrerleistung:  $P=70W$

Wirkungsgrad Antriebsstrang: ca. 90%  $\rightarrow P'=63W$

Geschwindigkeit  $v=20km/h$

$\rightarrow F_D=P'/v=11,34N$

$$K = 1,1 * \frac{1}{2} (1/11 [1/N] * F_B - 1)$$

$$K = 0,05 [1/N] * F_B - 0,55 \quad (10)$$

Mit  $F_B$  aus Gleichung (4) erhält man die Gleichung (1):

$$K = 0,05 [1/N] * (F_{B, \text{measured}} - F_{B, \text{comp}}) - 0,55 \quad (1)$$

K ist dimensionslos, daher muss zur Berechnung von (1)  $F_{B, \text{measured}}$  und  $F_{B, \text{comp}}$  in der Einheit [N] eingesetzt werden.