

Angabe 1

Untertitel

Daniel Graf, Dimitrie Diez, Arne Schöntag, Peter Müller

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	2
2	Messexperiment	3
3	Überprüfung auf Normalverteilung	3
3.1	In der Ebene	3
3.1.1	Grafische Überprüfung	4
3.1.2	Rechnerische Überprüfung	5
3.2	Beim Treppenaufstieg	5
3.2.1	Grafische Überprüfung	5
3.2.2	Rechnerische Überprüfung	7
3.3	Beim Treppenabstieg	7
3.3.1	Grafische Überprüfung	8
3.4	Rechnerische Überprüfung	8
4	Lineare Regression 2017	9
4.1	Prüfung auf eine einfache Abhängigkeit	10
4.1.1	Wunschgeschwindigkeit in der Ebene	10
4.1.2	Körpergröße	13
4.1.3	Rundennummer	15
4.2	Mehrere Abhängigkeiten	17
4.2.1	Ebenengeschwindigkeit und Größe	19
4.2.2	Ebenengeschwindigkeit, Größe und Rundennummer	19
4.3	Konditionierung	22
5	Ergebnisse	23
6	Lineare Regression 2012	23
6.1	Prüfung auf eine einfache Abhängigkeit	23
6.1.1	Wunschgeschwindigkeit in der Ebene	24
6.1.2	Körpergröße	26

6.1.3	Rundennummer	28
6.2	Mehrere Abhängigkeiten	30
6.2.1	Ebenengeschwindigkeit und Größe	32
6.2.2	Ebenengeschwindigkeit, Größe und Rundennummer	32
7	Vergleich mit Daten aus 2012	35
8	Verbund von alten und neuen Daten	35
8.1	Prüfung auf eine einfache Abhängigkeit	36
8.1.1	Wunschgeschwindigkeit in der Ebene	36
8.1.2	Körpergröße	37
8.1.3	Rundennummer	39
8.2	Prüfung auf mehrere Abhängigkeiten	41
8.2.1	Lineare Regression mit zwei Parametern	42
8.2.2	Lineare Regression mit drei Parametern	42
9	Fazit	45

1 Einführung

Da heutzutage das Laufverhalten von Menschen noch nicht vollständig erforscht ist, muss dieses durch Personenstromexperimente weiter untersucht werden. Vor allem sind das Laufverhalten und die Geschwindigkeit auf Treppen noch größtenteils unbekannt und werfen viele Fragen auf. Mit den gewonnenen Erkenntnissen dieser Untersuchungen ist es beispielsweise möglich, bei der Gebäudeplanung die Fluchtwege geeignet zu setzen. Eine schlechte Planung kann daher im Ernstfall schwere Folgen für die Insassen einer Einrichtung haben.

Diese Arbeit untersucht, ob ein möglicher Zusammenhang zwischen der Wunschgeschwindigkeit einer Person auf einer freien Fläche und der Wunschgeschwindigkeit auf einer Treppe. Dabei werden die Faktoren Körpergröße, Alter und Geschlecht betrachtet. Dazu werden zwei Hypothesen diskutiert:

- Die Geschwindigkeit auf der Treppe hängt linear von der Wunschgeschwindigkeit ab.
- Es gibt keinen Zusammenhang der Geschwindigkeit auf der Treppe mit der auf der Ebene durch die Taktung durch die Stufen.

Zur Behandlung dieser Problematik wird ein Messexperiment mit Probanden durchgeführt. Auf diesem Experiment basieren die darauffolgenden Untersuchungen und Beobachtungen. Die Daten des Messexperiments werden zunächst auf Normalverteilung untersucht. Anschließend wird über lineare Regression ermittelt, ob ein Zusammenhang zwischen Treppengeschwindigkeit und den Größen Wunschgeschwindigkeit, Körpergröße und Rundennummer besteht. Die daraus entstandenen Regressionsmodelle werden einem t-Test

unterzogen, um zu überprüfen, ob tatsächlich ein linearer Zusammenhang besteht. Die gewonnenen Erkenntnisse dieses Experiments werden im Zusammenhang mit bereits gemessenen Daten aus 2012 verglichen und ausgewertet.

2 Messexperiment

Das Messexperiment wurde am 05.04.2017 im Lichthof der Hochschule München (Lothstraße 64) durchgeführt. Es nahmen 22 Probanden im Alter von 20 – 29 Jahren teil. Das Experiment bestand aus drei Teilen.

Zunächst wurde die Wunschgeschwindigkeit in der Ebene gemessen. Hierfür ging jeder Proband eine markierte Strecke von 27,3m ab und stoppte die hierfür benötigte Zeit. Anschließend wurde dieser Vorgang zweimal wiederholt und die entsprechende Rundenummer vermerkt. Im zweiten Teil erfolgte die Messung der benötigten Zeit für einen Treppenaufstieg. Die Treppenlänge betrug 9m. Jeder Proband führte den Vorgang dreimal durch und vermerkte die benötigte Zeit und die entsprechende Rundenummer. Analog hierzu wurde im dritten Teil des Experiments die Zeit beim Treppenabstieg gemessen.

Neben den gemessenen Zeiten in jeder Runde, dem Alter und der Körpergröße ist auch das Geschlecht jedes Probanden bekannt. Weitere Informationen sind in der beiliegenden Versuchsbeschreibung *Choreographie_Treppengeschwindigkeit_2017* aufgeführt. In den folgenden Kapiteln erfolgt die Auswertung der ermittelten Messwerte.

3 Überprüfung auf Normalverteilung

Um zu überprüfen, ob die erhobenen Daten normalverteilt sind, kann eine Vielzahl verschiedener Methoden angewandt werden. Für eine aussagekräftige Beurteilung beschränkt sich diese Arbeit auf zwei grafische und drei rechnerische Methoden. Als grafische Verfahren werden ein Histogramm und ein Quantil-Quantil-Diagramm erstellt. Im Anschluss erfolgt die rechnerische Überprüfung mittels Shapiro-Wilk-, Cramér-von-Mises- und Anderson-Darling-Test. Aus den gemessenen Zeiten werden die Geschwindigkeiten der einzelnen Probanden ermittelt und für die erwähnten Testverfahren herangezogen. Die Geschwindigkeiten in der Ebene, beim Treppenaufstieg sowie beim Treppenabstieg werden jeweils gesondert betrachtet.

3.1 In der Ebene

Vor der Analyse muss geprüft werden, ob alle Daten plausibel sind, oder ob bestimmte Daten von der Analyse ausgeschlossen werden müssen. Bei der Betrachtung der einzelnen Messergebnisse fällt auf, dass ein Proband deutlich langsamer als die restlichen Probanden gegangen ist. Trotz dessen werden alle Messdaten berücksichtigt, da anzunehmen ist,

dass es immer Personen gibt, die langsamer oder schneller als die Mehrheit gehen. Es ist jedoch anzumerken, dass bei einem Versuch mit nur einer geringen Anzahl von Probanden, solche Ausreißer eventuell eine signifikante Abweichung verursachen.

3.1.1 Grafische Überprüfung

In Abbildung 1 wird die Verteilung der Geschwindigkeiten einer Normalverteilungskurve gegenübergestellt. Für die Berechnung der Normalverteilungskurve wurden Erwartungswert und Standardabweichung der Ergebnisse ermittelt. Der Erwartungswert beträgt $1,48 \frac{m}{s}$ und die Standardabweichung $0,144 \frac{m}{s}$. Das Histogramm bildet relative Häufigkeiten ab. Es fällt auf, dass eine deutliche Häufung der Ergebnisse in den Bereich des Maximums der Normalverteilungskurve fällt. Dies ist ein Anzeichen für eine Normalverteilung der Ergebnisse. Allerdings befinden sich auch an den Rändern der Normalverteilungskurve noch kleinere Häufungen der Ergebnisse. Somit kann aus dem Histogramm kein eindeutiger Rückschluss auf eine Normalverteilung der Geschwindigkeiten gezogen werden. Grundsätzlich ist die Darstellung des Histogramms stark von der gewählten Anzahl an Klassen abhängig und ist gerade bei kleineren Messreihen nicht aussagekräftig.

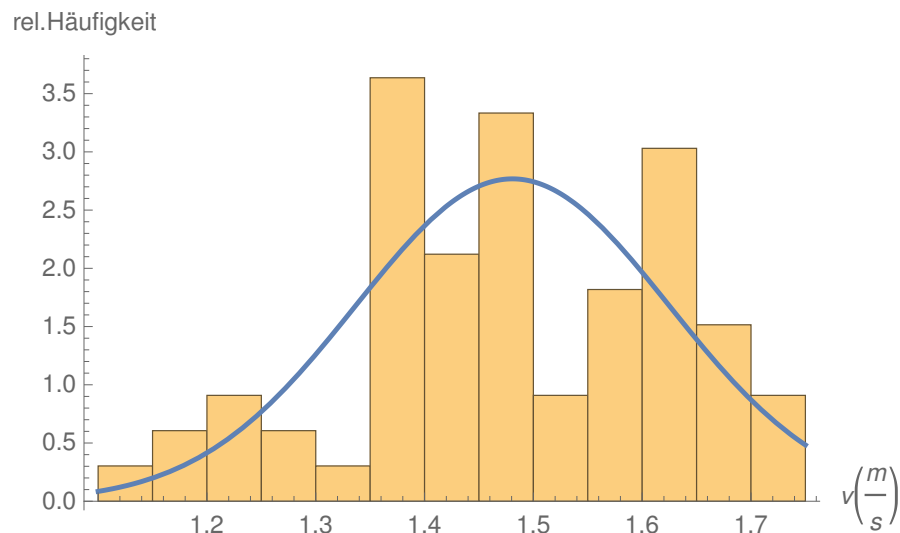


Abbildung 1: Histogramm der Geschwindigkeiten in der Ebene im Vergleich zur Normalverteilung

Abbildung 2 veranschaulicht die Verteilung der Geschwindigkeiten in einem Quantil-Quantil Diagramm. In diesem Diagramm sind die gemessenen Geschwindigkeiten gegenüber der Normalverteilung abgebildet. Da sich die Mehrheit der geplotteten Punkte auf oder in unmittelbarer Nähe der Diagonalen befindet, spricht dieses Diagramm für eine

Normalverteilung der Geschwindigkeiten. Für eine aussagekräftigere Beurteilung wird diese Thematik im Folgenden mit rechnerischen Tests überprüft.

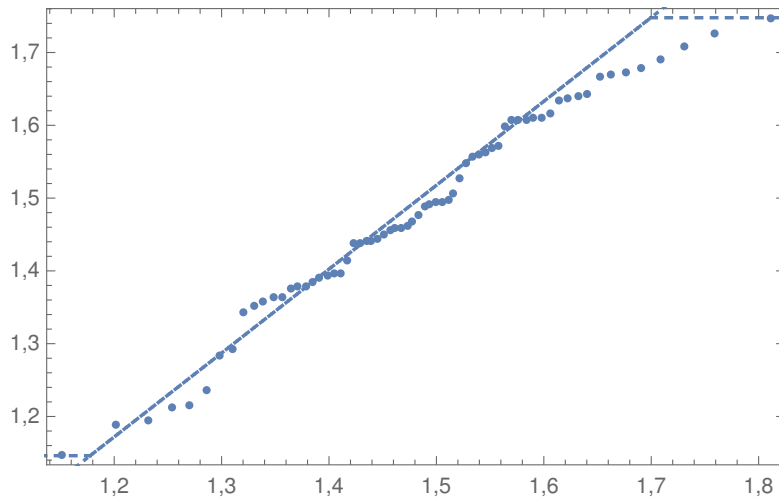


Abbildung 2: Quantil-Quantil-Diagramm der Geschwindigkeiten in der Ebene in $\frac{m}{s}$

3.1.2 Rechnerische Überprüfung

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse von mehreren Anpassungstests. Dabei werden die Messdaten auf Normalverteilung getestet. Exemplarisch werden im Folgenden Shapiro-Wilk-, Cramér-von-Mises- und Anderson-Darling-Test näher betrachtet und analysiert.

Laut dem Shapiro-Wilk-Test wird die Nullhypothese "Die Geschwindigkeiten sind normalverteilt" nicht verworfen, da der P-Wert das Signifikanzniveau von 0,05 überschreitet. Auch der Cramér-von-Mises-Test ergibt einen P-Wert von 0,84 und ist somit ebenfalls deutlich über dem Signifikanzniveau. Analog hierzu liefert der Anderson-Darling-Test einen weiteren Nachweis für die Normalverteilung der Geschwindigkeiten, da der P-Wert von 0,82 die 0,05 des Signifikanzniveaus ebenfalls überschreitet. (Der Anderson-Darling-Test gilt als aussagekräftigster statistischer Test)

Betrachtet man abschließend alle ermittelten Ergebnisse, kann man davon ausgehen, dass die Geschwindigkeiten der Probanden in der Ebene normalverteilt sind.

3.2 Beim Treppenaufstieg

3.2.1 Grafische Überprüfung

Bei der Betrachtung der Messergebnisse für den Treppenaufstieg fällt auf, dass vier Probanden stets mit höherer Geschwindigkeit gehen als die restlichen Probanden. Dieses

	Statistic	P-Value
Anderson-Darling	0.426988	0.821001
Baringhaus-Henze	0.269634	0.785711
Cramér-von Mises	0.0560719	0.838694
Jarque-Bera ALM	1.57313	0.376383
Mardia Combined	1.57313	0.376383
Mardia Kurtosis	-0.879486	0.379138
Mardia Skewness	0.82605	0.363417
Pearson χ^2	14.6667	0.144695
Shapiro-Wilk	0.975506	0.215767

Tabelle 1: Anpassungstests zur Überprüfung der gemessenen Geschwindigkeiten in der Ebene auf Normalverteilung

Verhalten wiederholt sich über alle Runden. Aufgrund der geringen Anzahl an Messwerten fällt dies bei der Auswertung stark ins Gewicht.

Für die weitere Überprüfung auf Normalverteilung werden zwei Auswertungen durchgeführt. Eine Auswertung erfolgt über alle Messreihen hinweg. Die betroffenen Probanden haben beim Aufstieg immer mehrere Treppen übersprungen. Es ist nicht auszuschließen, dass es in der Bevölkerung einen Anteil von Menschen gibt, die dieses Verhalten grundsätzlich aufweisen. Anschließend wird eine Auswertung durchgeführt, bei welcher die Ausreißer ausgeschlossen werden, da die Möglichkeit besteht, dass es sich um eine Anomalie oder um Sabotage handelt.

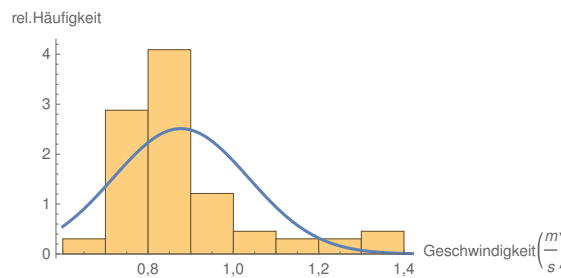


Abbildung 3: Histogramm der Geschwindigkeiten beim Treppenaufstieg mit Ausreißern im Vergleich zur Normalverteilung

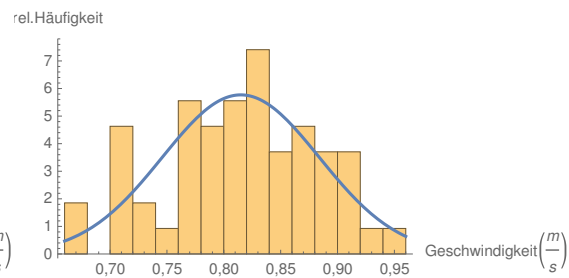


Abbildung 4: Histogramm der Geschwindigkeiten beim Treppenaufstieg ohne Ausreißer im Vergleich zur Normalverteilung

Das Histogramm in der Abbildung 3 deutet auf eine rechtsschiefe Verteilung der Geschwindigkeiten hin. Dies stellt ein Indiz gegen eine Normalverteilung der Messwerte dar. Im Gegensatz dazu weist das Histogramm in Abbildung 4 eine symmetrische Verteilung auf. Daher ist anzunehmen, dass die Messwerte ohne Ausreißer normalverteilt sind. Aber wie bereits erwähnt, sind Histogramme nur bedingt aussagekräftig. Eine genauere grafische Betrachtung erfolgt über ein Quantil-Quantil-Diagramm.

In Abbildung 5 ist deutlich eine Abweichung von der Normalverteilung zu sehen, da einige Werte weit von der Diagonalen entfernt sind. Dies ist auf die erwähnten vier Probanden zurückzuführen. Im Gegensatz dazu deutet die Abbildung 6 auf eine Normalverteilung hin, da alle Quantile auf oder in unmittelbarer Nähe der Diagonalen liegen.

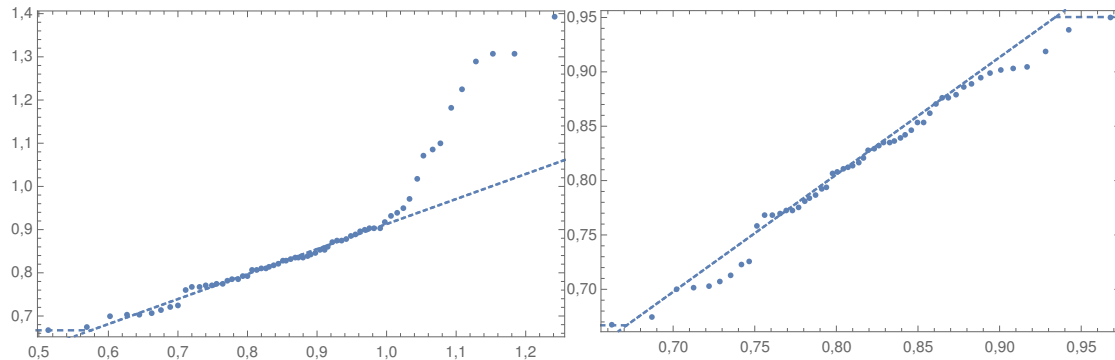


Abbildung 5: Quantil-Quantil-Diagramm der Geschwindigkeiten beim Treppenaufstieg mit Ausreißern in $\frac{m}{s}$

Abbildung 6: Quantil-Quantil-Diagramm der Geschwindigkeiten beim Treppenaufstieg ohne Ausreißer in $\frac{m}{s}$

3.2.2 Rechnerische Überprüfung

Die Anpassungstests zeigen, dass die Geschwindigkeiten bei einem Treppenaufstieg nicht normalverteilt sind, wenn man die Ausreißer mitberücksichtigt. Die Tabelle 3 zeigt, dass bei einem Cramér-von Mises Test ein p-Wert von nur 0,018 erreicht wird, welcher somit deutlich geringer als das Signifikanzniveau von 0,05 ist. Werden die Ausreißer nicht mitberücksichtigt, so ergibt der Cramér-von Mises Test einen p-Wert von 0,92, wie in Tabelle 2 zu sehen. Auch der Anderson-Darling Test liegt weit über dem Signifikanzniveau. Die rechnerische Überprüfung bestätigt somit das Ergebnis der grafischen Analyse. Wie bereits erwähnt, sind die Ausreißer immer von denselben vier Probanden verursacht worden. Diese haben beim Aufsteigen der Treppen in jeder Runde mehrere Stufen übersprungen. Die Vermutung liegt nahe, dass es eine Gruppe von Menschen gibt, die beim Aufsteigen der Treppen grundsätzlich schneller gehen. Eine genaue Untersuchung ist mit einer deutlich größeren Anzahl der Probanden notwendig.

3.3 Beim Treppenabstieg

Bei der Messung zum Abstieg von der Treppe gibt es wenig besondere Fälle. Die gemessenen Daten weisen nur wenige unregelmäßige Ausreißer aus. Diese werden erwartungsgemäß geringen Einfluss haben. Beim Treppenaufstieg wurden signifikante Unterschiede durch

	Statistic	P-Value		Statistic	P-Value
Anderson-Darling	0.33829	0.90645	Anderson-Darling	3.67396	0.0126832
Baringhaus-Henze	0.213705	0.858651	Baringhaus-Henze	4.53865	0.000403182
Cramér-von Mises	0.0421682	0.921661	Cramér-von Mises	0.638786	0.0179638
Jarque-Bera ALM	1.31475	0.440072	Jarque-Bera ALM	45.2212	0.000864057
Mardia Combined	1.31475	0.440072	Mardia Combined	45.2212	0.000864057
Mardia Kurtosis	-0.891517	0.372652	Mardia Kurtosis	3.44345	0.000574336
Mardia Skewness	0.553342	0.456956	Mardia Skewness	26.5574	2.55817*10 ⁻⁷
Pearson χ^2	12.2963	0.197116	Pearson χ^2	25.	0.00534551
Shapiro-Wilk	0.977864	0.414303	Shapiro-Wilk	0.835009	4.31299*10 ⁻⁷

Tabelle 2: Anpassungstests zur Überprüfung der gemessenen Geschwindigkeiten beim Treppenaufstieg ohne Ausreißern auf Normalverteilung

Tabelle 3: Anpassungstests zur Überprüfung der gemessenen Geschwindigkeiten beim Treppenaufstieg mit Ausreißern auf Normalverteilung

die Ausreißer festgestellt. Deswegen werden analog zum Aufstieg beim Abstieg auch zwei Analysen durchgeführt.

3.3.1 Grafische Überprüfung

Ein Vergleich der Histogramme in den Abbildungen 7 und 8 zeigt, dass die Ausreißer nur einen geringen Unterschied verursachen. In den Abbildungen ist jeweils eine Normalverteilungskurve dargestellt. Es zeigt sich, dass eine Normalverteilung nicht genau erkennbar ist.

Beim Betrachten des Quantil-Quantil-Diagramms in Abbildung 9 und 10, zeigt sich ebenfalls, dass der Unterschied der gesamten Daten und der bereinigten Daten sehr gering und mit bloßem Auge nicht zu erkennen ist. Aus den beiden Diagrammen wird deutlich, dass es sich bei beiden Fällen um eine Normalverteilung handelt, da der P-Wert in beiden Fällen über dem Signifikanzniveau von 0,05 liegt.

3.4 Rechnerische Überprüfung

Die rechnerische Überprüfung bestätigt die Analyse des Quantil-Quantil-Diagramms. Wie in Tabelle 4 und Tabelle 5 zu sehen, liegt in beiden Fällen eine Normalverteilung vor. Es ist zu bemerken, dass ein Anpassungstest anhand der Daten mit Ausreißern einen größeren p-Wert erzielt.

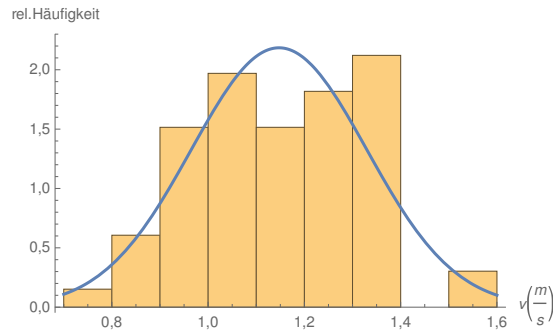


Abbildung 7: Histogramm der Geschwindigkeiten beim Treppenabstieg mit Ausreißern im Vergleich zur Normalverteilung

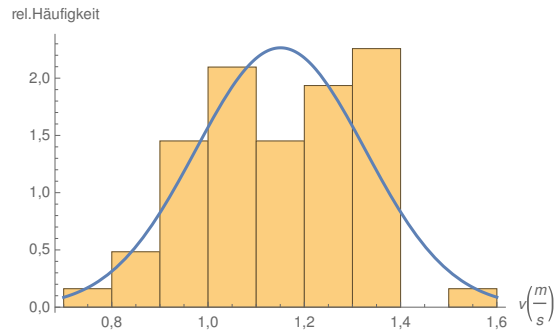


Abbildung 8: Histogramm der Geschwindigkeiten beim Treppenabstieg ohne Ausreißer im Vergleich zur Normalverteilung

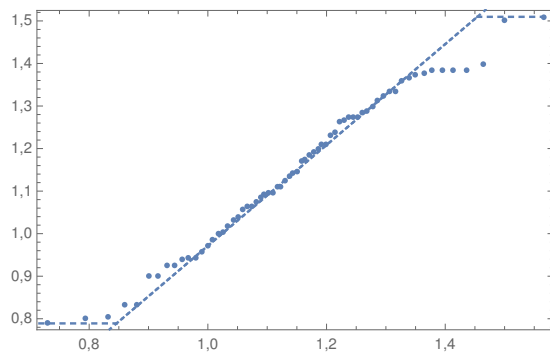


Abbildung 9: Quantil-Quantil-Diagramm der Geschwindigkeiten beim Treppenabstieg mit Ausreißern in $\frac{m}{s}$

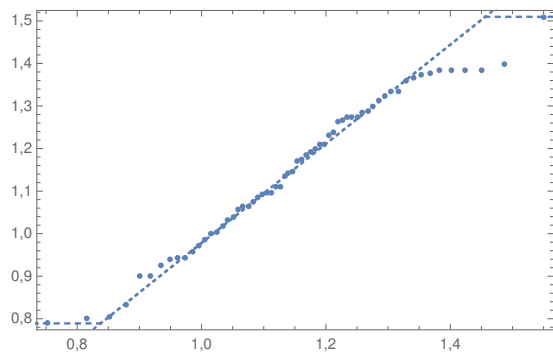


Abbildung 10: Quantil-Quantil-Diagramm der Geschwindigkeiten beim Treppenabstieg ohne Ausreißer in $\frac{m}{s}$

4 Lineare Regression 2017

Um Hinweise auf einen möglichen Zusammenhang der Treppengeschwindigkeit mit weiteren durch das Messexperiment ermittelten Größen zu finden, wird eine lineare Regression angewandt.

Die hier betrachteten Größen sind Wunschgeschwindigkeit (in der Ebene), Körpergröße und Rundennummer. Es wird gesondert die Treppengeschwindigkeit aufwärts und abwärts betrachtet. Zunächst wird nur auf eine Abhängigkeit überprüft, danach die Abhängigkeit von mehreren kombinierten Größen. Die Zusammenhänge werden bezüglich ihrer Plausibilität bewertet.

	Statistic	P-Value		Statistic	P-Value
Anderson-Darling	0.440903	0.806782	Anderson-Darling	0.54237	0.70308
Baringhaus-Henze	0.420106	0.556077	Baringhaus-Henze	0.484286	0.455989
Cramér-von Mises	0.0609776	0.807822	Cramér-von Mises	0.0788816	0.698349
Jarque-Bera ALM	2.23559	0.247476	Jarque-Bera ALM	1.99557	0.277317
Mardia Combined	2.23559	0.247476	Mardia Combined	1.99557	0.277317
Mardia Kurtosis	-1.43247	0.152009	Mardia Kurtosis	-1.32774	0.184265
Mardia Skewness	0.156589	0.692316	Mardia Skewness	0.190686	0.662346
Pearson χ^2	10.3333	0.411752	Pearson χ^2	6.37037	0.702354
Shapiro-Wilk	0.974316	0.186898	Shapiro-Wilk	0.969539	0.183952

Tabelle 4: Anpassungstests zur Überprüfung der gemessenen Geschwindigkeiten beim Treppenabstieg mit Ausreißern auf Normalverteilung

Tabelle 5: Anpassungstests zur Überprüfung der gemessenen Geschwindigkeiten beim Treppenabstieg ohne Ausreißern auf Normalverteilung

4.1 Prüfung auf eine einfache Abhängigkeit

Hier werden sechs Gleichungen mittels linearer Regression ermittelt:

$$v_{auf}(v_{ebene}) = \beta_0 + \beta_1 v_{ebene}$$

$$v_{ab}(v_{ebene}) = \beta_0 + \beta_1 v_{ebene}$$

$$v_{auf}(groesse) = \beta_0 + \beta_1 groesse$$

$$v_{ab}(groesse) = \beta_0 + \beta_1 groesse$$

$$v_{auf}(runde) = \beta_0 + \beta_1 runde$$

$$v_{ab}(runde) = \beta_0 + \beta_1 runde$$

4.1.1 Wunschgeschwindigkeit in der Ebene

Für die Abhängigkeit Wunschgeschwindigkeit in der Ebene wurde der Zusammenhang wie in den Formeln für die Treppengeschwindigkeit aufwärts (1) und abwärts (2) ermittelt.

$$v_{auf}(v_{ebene}) = 0.294389 + 0.393467 v_{ebene} \quad (1)$$

$$v_{ab}(v_{ebene}) = 0.475883 + 0.453419 v_{ebene} \quad (2)$$

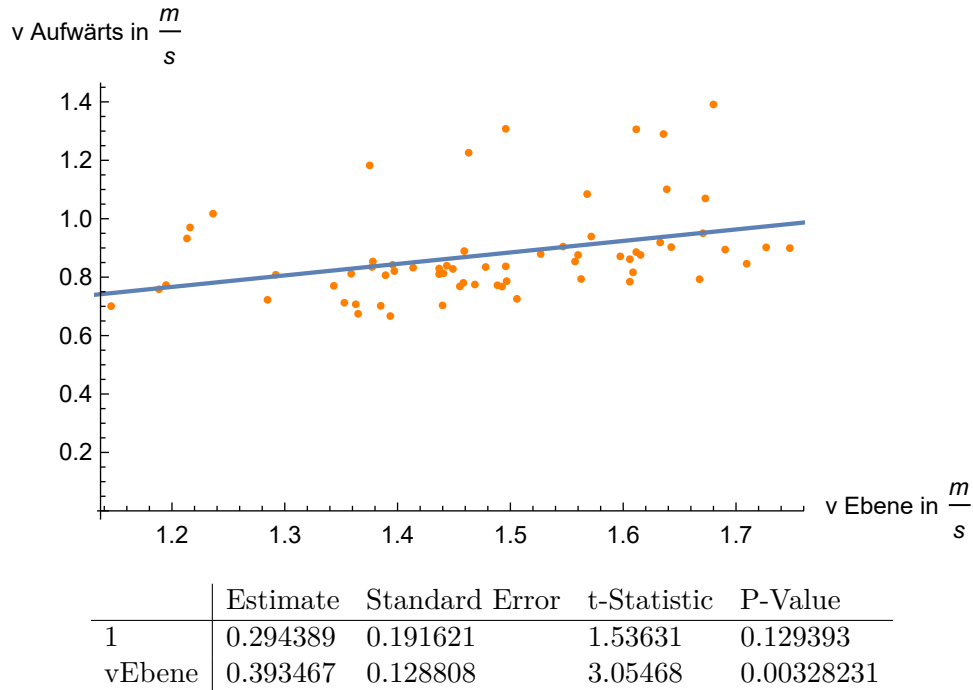


Abbildung 11: Abhängigkeit Wunschgeschwindigkeit in der Ebene zur Treppengeschwindigkeit aufwärts. Messdaten (orange) mit ermittelter Regressionsgerade (blau).

Beide Steigungen sind positiv. Hat ein Proband eine schnellere Wunschgeschwindigkeit in der Ebene, verhält er sich auch schneller auf der Treppe. Die Abbildungen 11 und 12 stellen dies grafisch dar.

In Abbildung 11 sind wieder deutlich die schon in der Betrachtung zur Normalverteilung erwähnten Ausreißer zu erkennen. Deshalb wurde die lineare Regression für den gefilterten Messdatensatz (nur Datensätze ohne Bemerkung) durchgeführt. Es ergeben sich neue Formeln für die Treppengeschwindigkeit aufwärts (3) und abwärts (4). Dazu gehören Abbildungen 13 und 14. Die Ausreißer wurden in der Regression hier nicht verwendet, sind aber hervorgehoben eingezeichnet. Bei der Treppengeschwindigkeit aufwärts sind es deutlich mehr Ausreißer und sie fallen alle in den schnelleren Bereich. Die Regressionsgerade für die Daten ohne Ausreißer liegt dementsprechend etwas weiter unter (langsamer) im Vergleich zu Abbildung 11. Bei Abbildung 14 sind es nur vier Ausreißer. Sie sind auch stärker gestreut. Die Regressionsgerade für den Zusammenhang zur Geschwindigkeit abwärts wird nicht besonders von dem Weglassen der Ausreißer beeinflusst. Die Ausreißer werden in den weiteren Regressionen nicht genauer betrachtet. Alle Abbildungen und Plausibilisierungstests dazu sind aber als Dateien angelegt.

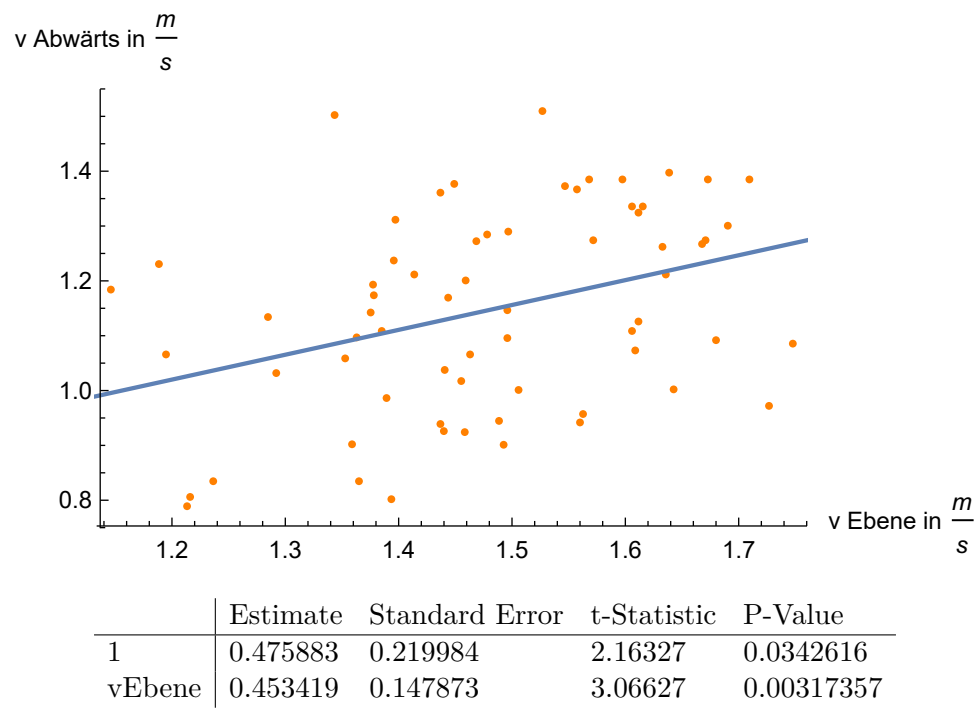
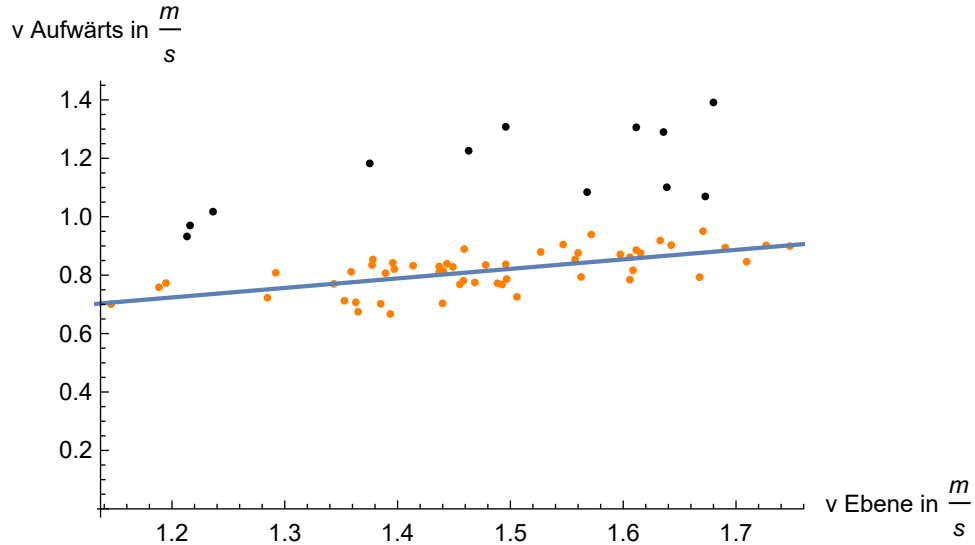


Abbildung 12: Abhängigkeit Wunschgeschwindigkeit in der Ebene zur Treppengeschwindigkeit abwärts. Messdaten (orange) mit ermittelter Regressionsgerade (blau).



	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	0.332577	0.0799809	4.15821	0.000120293
vEbene	0.325892	0.0538149	6.0558	1.5716478126903015*^-7

Abbildung 13: Abhängigkeit Wunschgeschwindigkeit in der Ebene zur Treppengeschwindigkeit aufwärts. Gefilterte Messdaten (orange) und Ausreißer (schwarz) mit ermittelter Regressionsgerade (blau).

$$v'_{auf}(v_{ebene}) = 0.332577 + 0.325892v_{ebene} \quad (3)$$

$$v'_{ab}(v_{ebene}) = 0.440848 + 0.478525v_{ebene} \quad (4)$$

Für die Plausibilisierung der Regression wird die Nullhypothese $H_0 : \beta_1 = 0$ aufgestellt. Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$. Die Ergebnisse des Tests sind in Abbildung 11 zu sehen. Signifikanz liegt vor, weil $p < \alpha$. Man verwirft die Nullhypothese. Kein Einfluss von v_{ebene} auf v_{auf} wäre unplausibel, wenn auch nicht ausgeschlossen.

Die Nullhypothese und das Signifikanzniveau sind für alle folgenden Regressionen gleich. Die Ergebnisse für den Abstieg sind in Abbildung 12 zu sehen. Signifikanz liegt vor, weil $p < \alpha$. Man verwirft die Nullhypothese. Kein Einfluss von v_{ebene} auf v_{ab} wäre unplausibel, wenn auch nicht ausgeschlossen.

4.1.2 Körpergröße

Für die Abhängigkeit Körpergröße wurde der Zusammenhang (5) und (6) ermittelt.

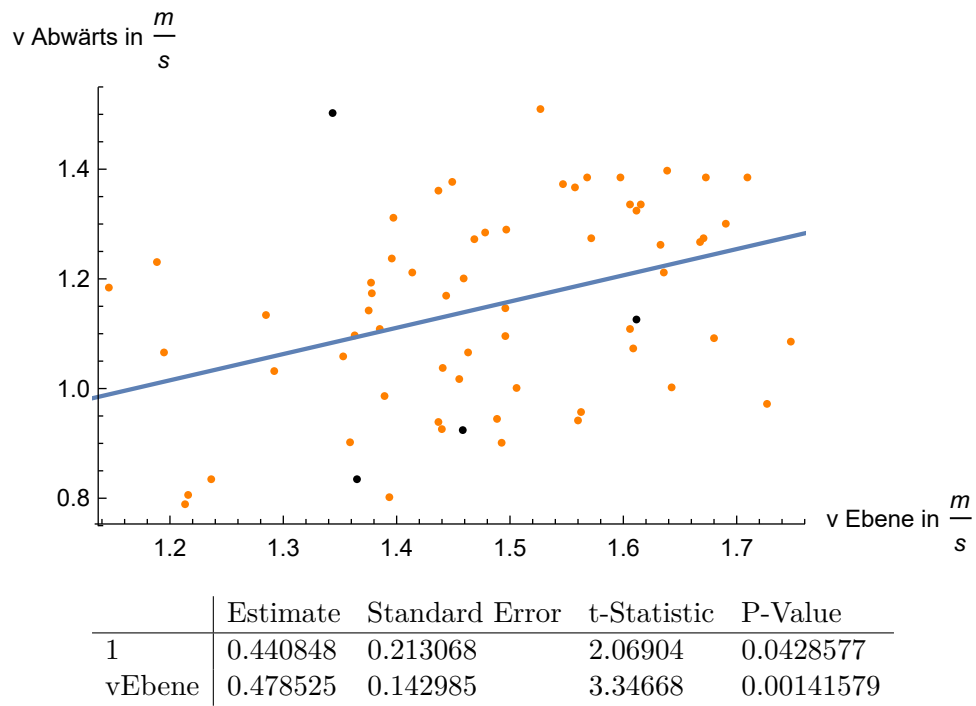


Abbildung 14: Abhängigkeit Wunschgeschwindigkeit in der Ebene zur Treppengeschwindigkeit abwärts. Gefilterte Messdaten (orange) und Ausreißer (schwarz) mit ermittelter Regressionsgerade (blau).

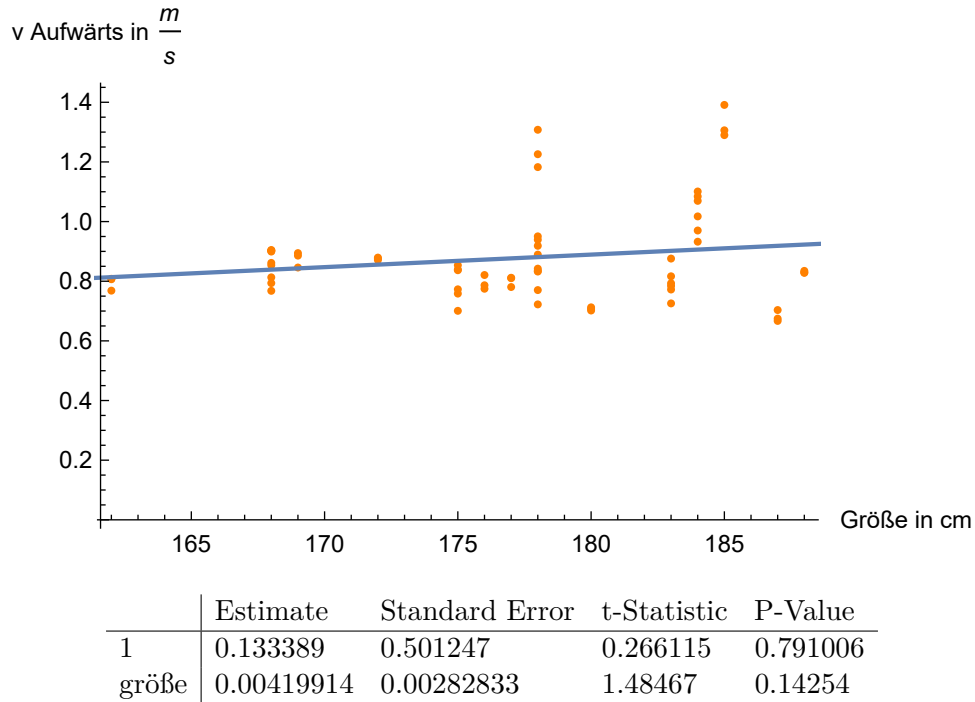


Abbildung 15: Abhängigkeit Körpergröße zur Treppengeschwindigkeit aufwärts. Messdaten (orange) mit ermittelter Regressionsgerade (blau).

$$v_{auf}(groesse) = 0.133389 + 0.00419914groesse \quad (5)$$

$$v_{ab}(groesse) = 1.59558 - 0.00253145groesse \quad (6)$$

In den Abbildungen 15 und 16 ist zu sehen, dass nach dem Modell größere Personen leicht schneller Treppen besteigen, aber beim herabsteigen etwas langsamer als kleinere Personen sind.

Ergebnisse der Plausibilisierung für den Aufstieg (Abbildung 15): Signifikanz liegt nicht vor, weil $p > \alpha$. Man nimmt die Nullhypothese an. Kein Einfluss von *groesse* auf v_{auf} ist plausibel.

Ergebnisse der Plausibilisierung für den Abstieg (Abbildung 16): Signifikanz liegt vor, weil $p > \alpha$. Man nimmt die Nullhypothese an. Kein Einfluss von *groesse* auf v_{ab} ist plausibel.

4.1.3 Rundennummer

Für die Abhängigkeit Rundennummer wurde der Zusammenhang (7) und (8) ermittelt.

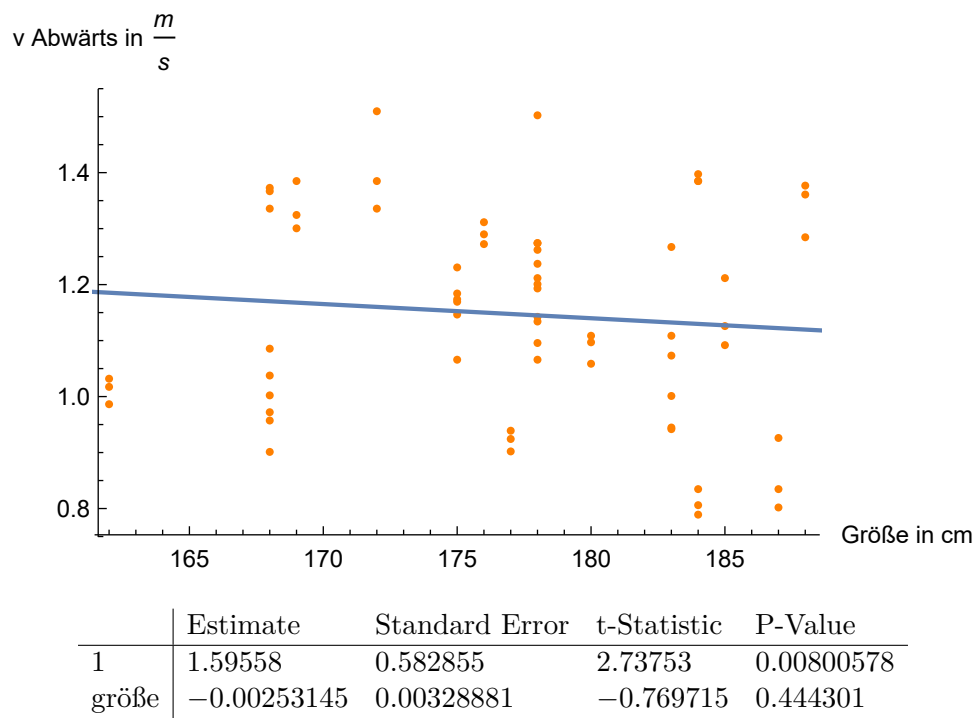


Abbildung 16: Abhängigkeit Körpergröße zur Treppengeschwindigkeit abwärts. Messdaten (orange) mit ermittelter Regressionsgerade (blau).

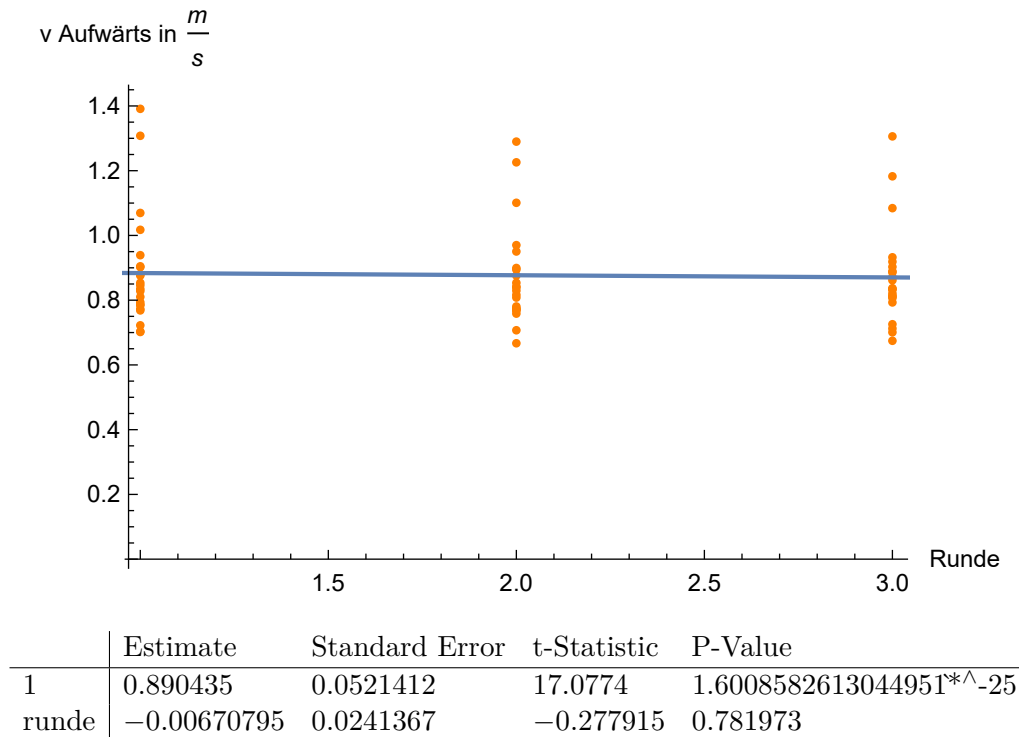


Abbildung 17: Abhängigkeit Rundennummer zur Treppengeschwindigkeit aufwärts. Messdaten (orange) mit ermittelter Regressionsgerade (blau).

$$v_{auf}(runde) = 0.890435 - 0.00670795runde \quad (7)$$

$$v_{ab}(runde) = 1.14614 + 0.000574582runde \quad (8)$$

In den Abbildungen 17 und 18 ist zu sehen, dass sich nach dem Modell die Treppengeschwindigkeit bei Änderung der Runde fast nicht ändert.

Ergebnisse der Plausibilisierung für den Aufstieg (Abbildung 17): Signifikanz liegt nicht vor, weil $p > \alpha$. Man nimmt die Nullhypothese an. Kein Einfluss von $runde$ auf v_{auf} ist plausibel.

Ergebnisse der Plausibilisierung für den Abstieg (Abbildung 18): Signifikanz liegt vor, weil $p > \alpha$. Man nimmt die Nullhypothese an. Kein Einfluss von $runde$ auf v_{ab} ist plausibel.

4.2 Mehrere Abhängigkeiten

Hier werden weitere vier lineare Gleichungen mit mehreren Parametern ermittelt.

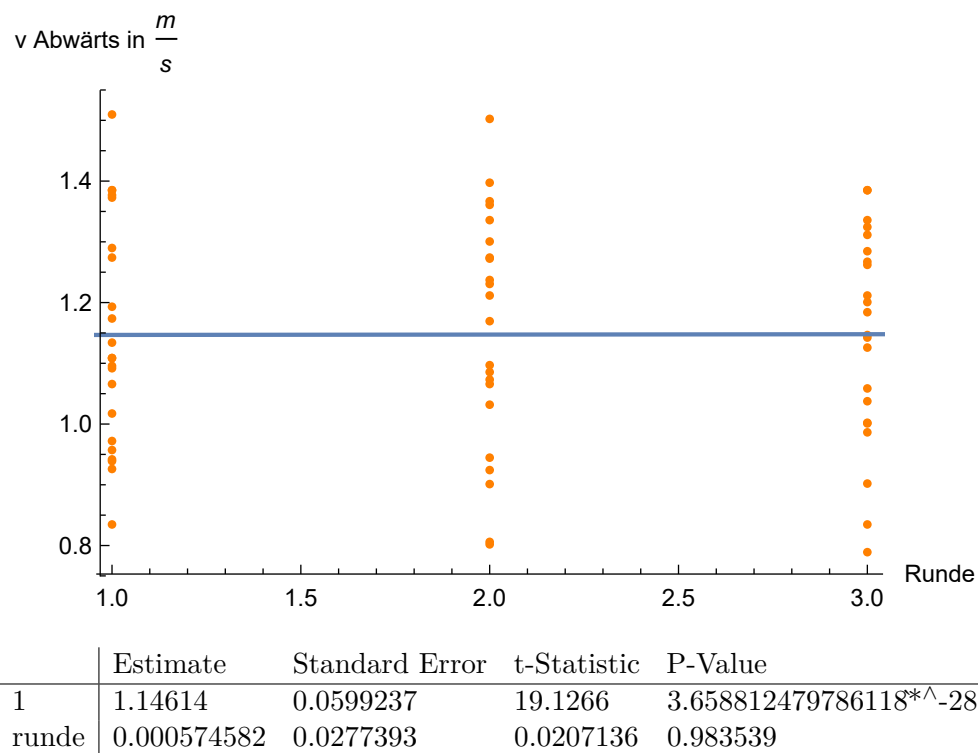


Abbildung 18: Abhängigkeit Rundennummer zur Treppengeschwindigkeit abwärts. Messdaten (orange) mit ermittelter Regressionsgerade (blau).

$$v_{auf}(v_{ebene}, groesse) = \beta_0 + \beta_1 v_{ebene} + \beta_2 groesse$$

$$v_{ab}(v_{ebene}, groesse) = \beta_0 + \beta_1 v_{ebene} + \beta_2 groesse$$

$$v_{auf}(v_{ebene}, groesse, runde) = \beta_0 + \beta_1 v_{ebene} + \beta_2 groesse + \beta_3 runde$$

$$v_{ab}(v_{ebene}, groesse, runde) = \beta_0 + \beta_1 v_{ebene} + \beta_2 groesse + \beta_3 runde$$

Für die Plausibilisierung der Regression wird die Nullhypothese $H_0 : \beta_1 = 0 \vee \beta_2 = 0$ bzw. $H_0 : \beta_1 = 0 \vee \beta_2 = 0 \vee \beta_3 = 0$ aufgestellt.

4.2.1 Ebenengeschwindigkeit und Größe

Für die Abhängigkeiten Wunschgeschwindigkeit in der Ebene und Körpergröße wurde der Zusammenhang (9) und (10) ermittelt.

$$v_{auf}(v_{ebene}, groesse) = -0.691667 + 0.425116v_{ebene} + 0.00530344groesse \quad (9)$$

$$v_{auf}(v_{ebene}, groesse) = 0.731523 + 0.445214v_{ebene} + -0.00137494groesse \quad (10)$$

In den Abbildungen 19 und 20 ist zu sehen, dass ein größerer Proband mit schnellerer Ebenengeschwindigkeit auch eine schnellere Treppengeschwindigkeit aufwärts erreicht. Eine schnellere Treppengeschwindigkeit abwärts wird durch einen Proband mit schnellerer Ebenengeschwindigkeit und kleinerer Größe erreicht. Eine Änderung von $50cm$ in der Größe wirkt sich auf das Besteigen aufwärts mit ca. $0.25m/s$ und abwärts mit ca. $0.05m/s$ aus.

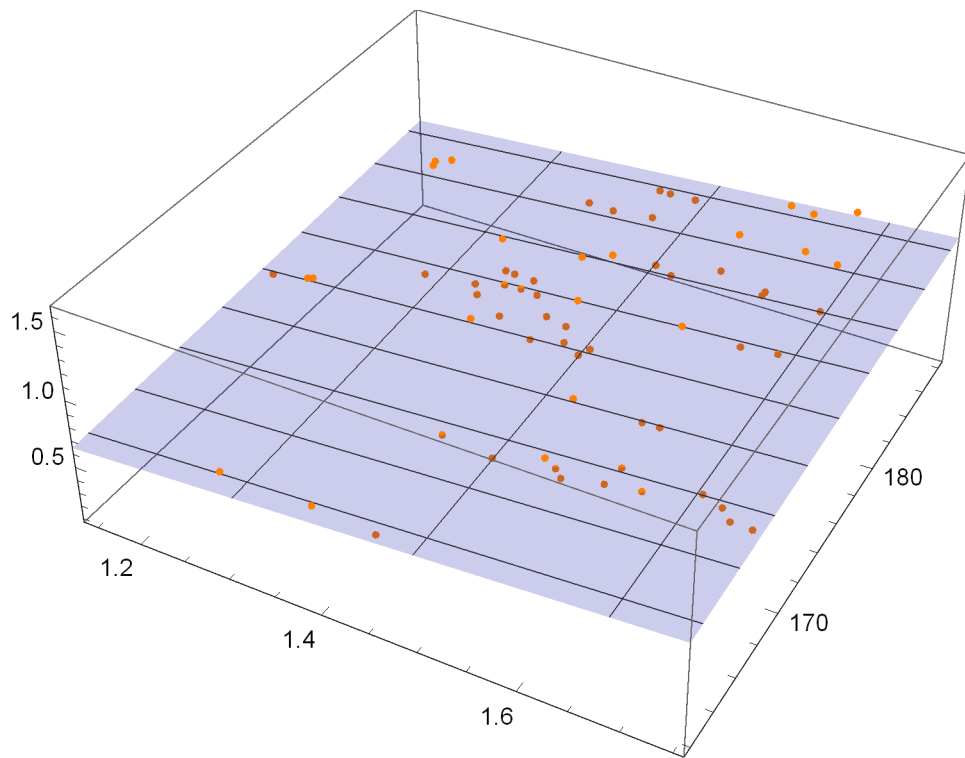
Ergebnisse der Plausibilisierung für den Aufstieg (Abbildung 19): Signifikanz liegt vor, weil beide $p < \alpha$. Man lehnt die Nullhypothese ab. Kein Einfluss von v_{ebene} und $groesse$ auf v_{auf} ist unplausibel.

Ergebnisse der Plausibilisierung für den Abstieg (Abbildung 20): Signifikanz liegt nicht vor, weil $p_{\beta_2} > \alpha$. Man nimmt die Nullhypothese an. Kein Einfluss von v_{ebene} und $groesse$ auf v_{ab} ist plausibel.

4.2.2 Ebenengeschwindigkeit, Größe und Rundennummer

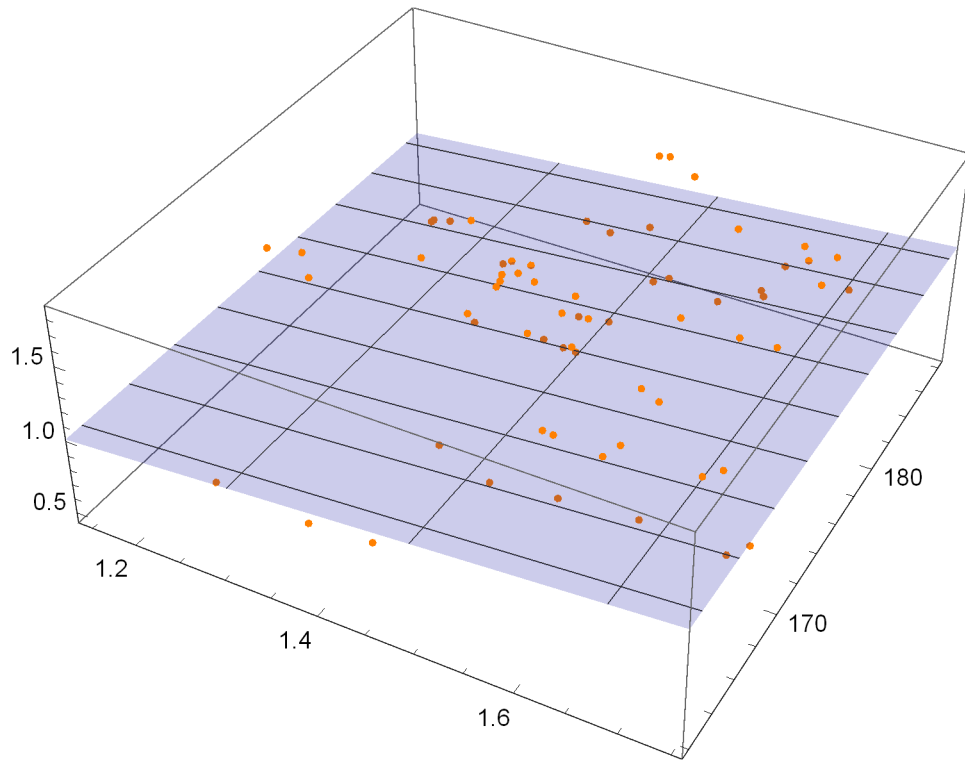
Für die Abhängigkeiten Wunschgeschwindigkeit in der Ebene, Körpergröße und Rundennummer wurde der Zusammenhang (11) und (12) ermittelt.

$$v_{auf}(v_{ebene}, groesse, runde) = -0.68569 + 0.424337v_{ebene} + 0.00530141groesse + -0.00223211runde \quad (11)$$



	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	-0.691667	0.526543	-1.3136	0.193745
vEbene	0.425116	0.126864	3.35095	0.0013649
größe	0.00530344	0.00264683	2.00369	0.0494078

Abbildung 19: Abhängigkeiten Ebenengeschwindigkeit und Größe zur Treppengeschwindigkeit aufwärts. Messdaten (orange) mit ermittelter Regressionsebene (blau).



	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	0.731523	0.622489	1.17516	0.244354
vEbene	0.445214	0.149981	2.96846	0.00422828
größe	-0.00137494	0.00312913	-0.439401	0.661875

Abbildung 20: Abhängigkeiten Ebenengeschwindigkeit und Größe zur Treppengeschwindigkeit abwärts. Messdaten (orange) mit ermittelter Regressionsebene (blau).

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	-0.68569	0.534068	-1.2839	0.203954
vEbene	0.424337	0.128109	3.31231	0.00154696
größe	0.00530141	0.00266795	1.98707	0.0513371
runde	-0.00223211	0.0222654	-0.10025	0.920469

Abbildung 21: Abhängigkeiten Ebenengeschwindigkeit, Größe und Runde zur Treppengeschwindigkeit aufwärts.

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	0.717358	0.631231	1.13644	0.260145
vEbene	0.447061	0.151416	2.95254	0.00444651
größe	-0.00137015	0.00315333	-0.434507	0.665429
runde	0.00529011	0.0263161	0.201022	0.84134

Abbildung 22: Abhängigkeiten Ebenengeschwindigkeit, Größe und Runde zur Treppengeschwindigkeit abwärts.

$$v_{auf}(v_{ebene}, groesse, runde) = 0.717358 + 0.447061v_{ebene} + -0.00137015groesse + 0.00529011runde \quad (12)$$

Ergebnisse der Plausibilisierung für den Aufstieg (Abbildung 21): Signifikanz liegt nicht vor, weil $p_{\beta_2} > \alpha$ und $p_{\beta_3} > \alpha$. Man nimmt die Nullhypothese an.

Ergebnisse der Plausibilisierung für den Abstieg (Abbildung 22): Signifikanz liegt nicht vor, weil $p_{\beta_2} > \alpha$ und $p_{\beta_3} > \alpha$. Man nimmt die Nullhypothese an.

4.3 Konditionierung

Die Konditionierung des Problems wurde anhand der Desingmatrix des linearen Modells untersucht. Je näher ein ermittelter Wert an 1 liegt, desto besser ist das Problem konditioniert.

Bei der Untersuchung der Treppengeschwindigkeit aufwärts wurde ein Konditionierungswert von 744.683 ermittelt. Auch bei der Betrachtung der Treppengeschwindigkeit abwärts wurde ähnliches Ergebnis von 654.274 berechnet. Die Betrachtung zweier Parameter (Ebenengeschwindigkeit und Körpergröße) ergab sogar den Wert $3.27621 \cdot 10^7$. Diese schlechte Konditionierung erfolgt durch Rechenfehlern, die bei numerischen Berechnungen erfolgen. In diesen Berechnungen wurden 3 (2.87197, 2.81576) bzw. 7.47687 Dezimalstellen

verloren. Diese Zahlen wurden mit dem dekadischen Logarithmus (zur Basis 10) der Kondition bestimmt.

Wenn man die Konditionierung mit der QR-Zerlegung betrachtet, welche auch in Wirklichkeit von Mathematica verwendet wird, wurde eine wesentlich bessere Konditionierung ermittelt.

Die Betrachtung der Konditionierung der oberen Dreiecksmatrix R ergab bei der Treppengeschwindigkeit aufwärts nun einen Wert von 29.6338. Hierbei wurden auch weniger verlorene Dezimalstellen festgestellt. Diese betrugen nur noch 1.47179. Bei der Treppengeschwindigkeit abwärts wurde eine Konditionierung von 27.9171 und 7164.48 bei zwei Parametern (Verlorene Dezimalstellen bei 1.44587 bzw. 3.83839). Bei einem Parameter - der Ebenengeschwindigkeit - ist die Konditionierung nun deutlich besser. Für zwei Parameter (Körpergröße und Ebenengeschwindigkeit) lässt sich schließen, dass für diese Auswertung das Problem tatsächlich schlecht konditioniert ist und die Aussagekraft der Ergebnisse bei dieser Untersuchung in Frage gestellt werden kann.

Dadurch, dass Mathematica die QR-Zerlegung benutzt sind diese Ergebnisse auch wesentlich aussagekräftiger als die erste Untersuchung der Konditionierung.

5 Ergebnisse

6 Lineare Regression 2012

Hier werden analog zu 2017 die Messdaten aus dem Experiment von 2012 mit linearer Regression betrachtet.

6.1 Prüfung auf eine einfache Abhängigkeit

Hier werden sechs Gleichungen mittels linearer Regression ermittelt:

$$v_{auf}(v_{ebene}) = \beta_0 + \beta_1 v_{ebene}$$

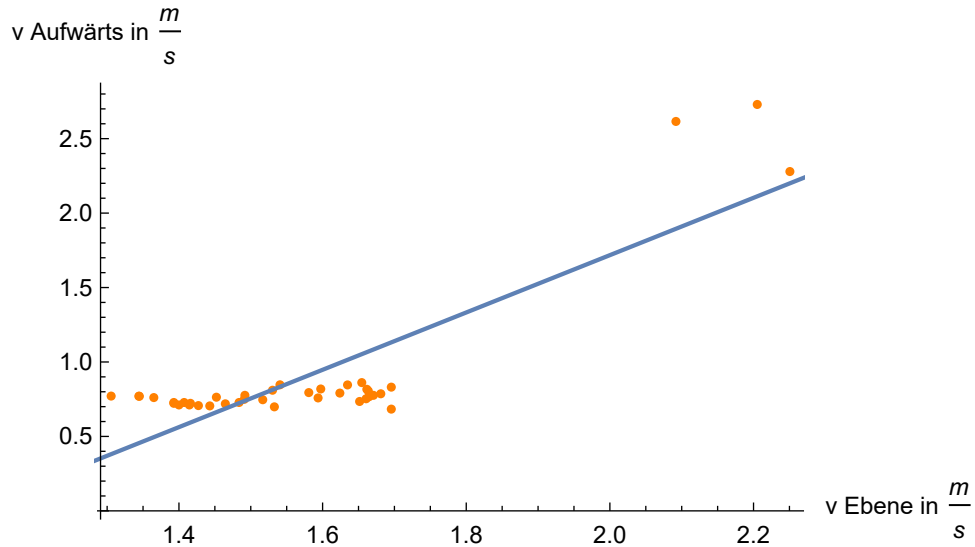
$$v_{ab}(v_{ebene}) = \beta_0 + \beta_1 v_{ebene}$$

$$v_{auf}(groesse) = \beta_0 + \beta_1 groesse$$

$$v_{ab}(groesse) = \beta_0 + \beta_1 groesse$$

$$v_{auf}(runde) = \beta_0 + \beta_1 runde$$

$$v_{ab}(runde) = \beta_0 + \beta_1 runde$$



	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	-2.13306	0.320263	-6.66034	$8.069908312350416 \times 10^{-8}$
vEbene	1.92532	0.20153	9.55352	$1.569742311808597 \times 10^{-11}$

Abbildung 23: Abhängigkeit Wunschgeschwindigkeit in der Ebene zur Treppengeschwindigkeit aufwärts. Messdaten (orange) mit ermittelter Regressionsgerade (blau).

6.1.1 Wunschgeschwindigkeit in der Ebene

Für die Abhängigkeit Wunschgeschwindigkeit in der Ebene wurde der Zusammenhang wie in den Formeln für die Treppengeschwindigkeit aufwärts (13) und abwärts (14) ermittelt.

$$v_{auf}(v_{ebene}) = -2.13306 + 1.92532v_{ebene} \quad (13)$$

$$v_{ab}(v_{ebene}) = -1.05942 + 1.28244v_{ebene} \quad (14)$$

Beide Steigungen sind positiv. Hat ein Proband eine schnellere Wunschgeschwindigkeit in der Ebene, verhält er sich auch schneller auf der Treppe. Die Abbildungen 23 und 24 stellen dies grafisch dar.

In Abbildung 23 sind wieder Ausreißer zu erkennen. In 2012 sind die Ausreißer (Datensätze mit Bemerkung) viel stärker ausgeprägt. Es ergeben sich neue Formeln für die Treppengeschwindigkeit aufwärts (15) und abwärts (16). Dazu gehören Abbildungen 25 und 26. Zur Vergleichbarkeit wurden aber dennoch in den weiteren Regressionen alle Daten (mit Ausreißern) verwendet.

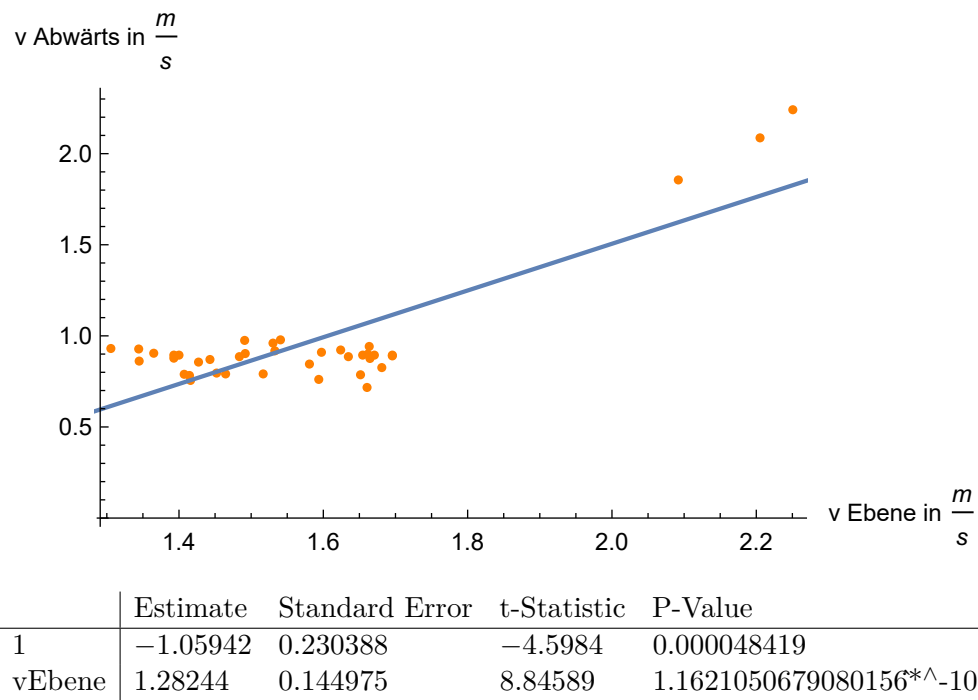


Abbildung 24: Abhängigkeit Wunschgeschwindigkeit in der Ebene zur Treppengeschwindigkeit abwärts. Messdaten (orange) mit ermittelter Regressionsgerade (blau).

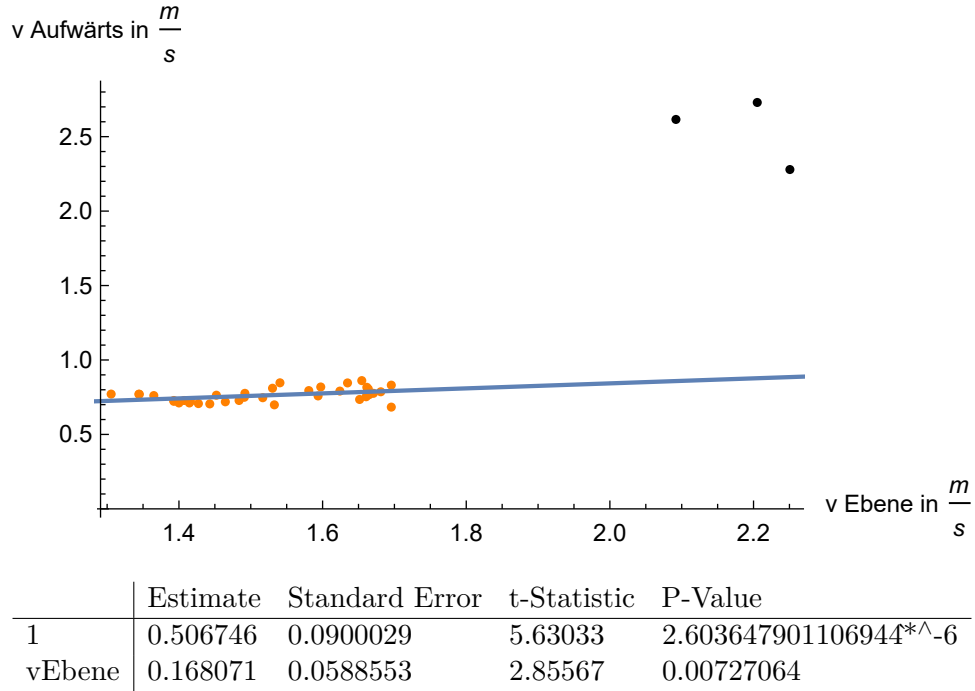


Abbildung 25: Abhängigkeit Wunschgeschwindigkeit in der Ebene zur Treppengeschwindigkeit aufwärts. Gefilterte Messdaten (orange) und Ausreißer (schwarz) mit ermittelter Regressionsgerade (blau).

$$v'_{auf}(v_{ebene}) = 0.506746 + 0.168071v_{ebene} \quad (15)$$

$$v'_{ab}(v_{ebene}) = 0.875577 - 0.00429171v_{ebene} \quad (16)$$

Für die Plausibilisierung der Regression wird die Nullhypothese $H_0 : \beta_1 = 0$ aufgestellt. Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$. Die Ergebnisse des Tests sind in Abbildung 23 zu sehen. Signifikanz liegt vor, weil $p < \alpha$. Man verwirft die Nullhypothese. Kein Einfluss von v_{ebene} auf v_{auf} wäre unplausibel, wenn auch nicht ausgeschlossen.

Die Nullhypothese und das Signifikanzniveau sind für alle folgenden Regressionen gleich. Die Ergebnisse für den Abstieg sind in Abbildung 24 zu sehen. Signifikanz liegt vor, weil $p < \alpha$. Man verwirft die Nullhypothese. Kein Einfluss von v_{ebene} auf v_{ab} wäre unplausibel, wenn auch nicht ausgeschlossen.

6.1.2 Körpergröße

Für die Abhängigkeit Körpergröße wurde der Zusammenhang (17) und (18) ermittelt.

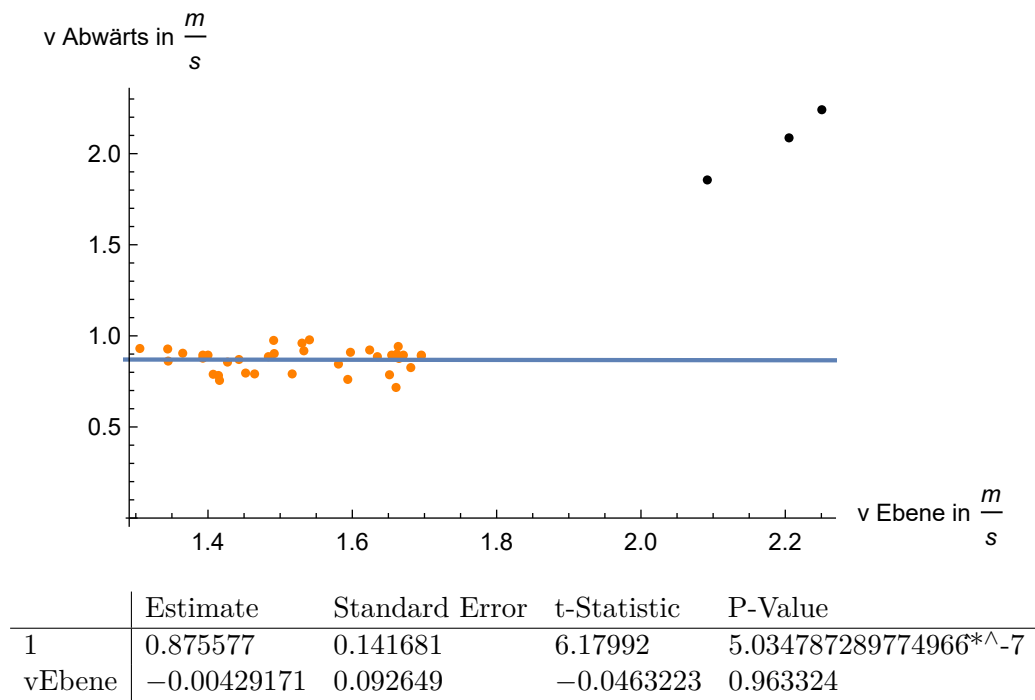


Abbildung 26: Abhängigkeit Wunschgeschwindigkeit in der Ebene zur Treppengeschwindigkeit abwärts. Gefilterte Messdaten (orange) und Ausreißer (schwarz) mit ermittelter Regressionsgerade (blau).

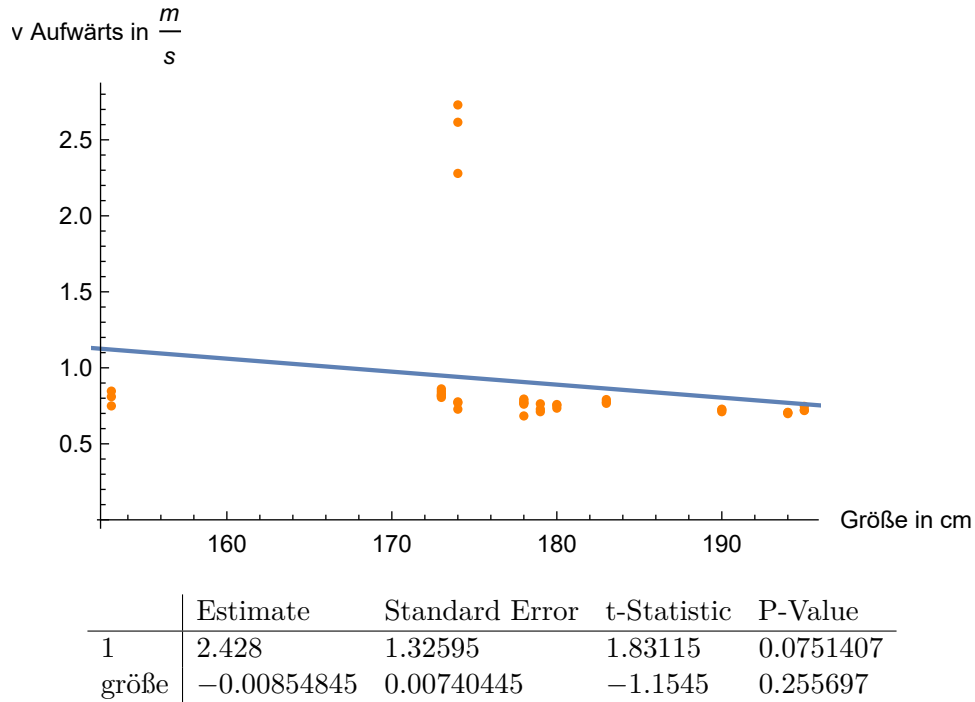


Abbildung 27: Abhängigkeit Körpergröße zur Treppengeschwindigkeit aufwärts. Messdaten (orange) mit ermittelter Regressionsgerade (blau).

$$v_{auf}(groesse) = 2.428 - 0.00854845groesse \quad (17)$$

$$v_{ab}(groesse) = 2.20944 - 0.00698501groesse \quad (18)$$

In den Abbildungen 27 und 28 ist zu sehen, dass sich nach dem Modell größere Personen egal ob aufwärts oder abwärts langsamer auf der Treppe bewegen.

Ergebnisse der Plausibilisierung für den Aufstieg (Abbildung 27): Signifikanz liegt nicht vor, weil $p > \alpha$. Man nimmt die Nullhypothese an. Kein Einfluss von *groesse* auf v_{auf} ist plausibel.

Ergebnisse der Plausibilisierung für den Abstieg (Abbildung 28): Signifikanz liegt vor, weil $p > \alpha$. Man nimmt die Nullhypothese an. Kein Einfluss von *groesse* auf v_{ab} ist plausibel.

6.1.3 Rundennummer

Für die Abhängigkeit Rundennummer wurde der Zusammenhang (19) und (20) ermittelt.

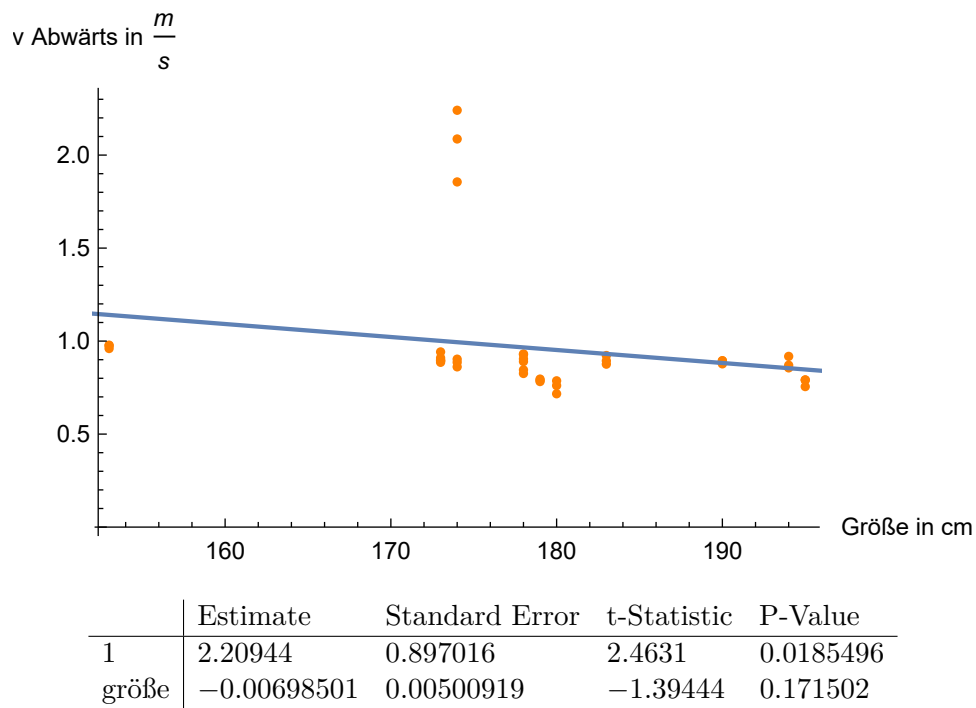


Abbildung 28: Abhängigkeit Körpergröße zur Treppengeschwindigkeit abwärts. Messdaten (orange) mit ermittelter Regressionsgerade (blau).

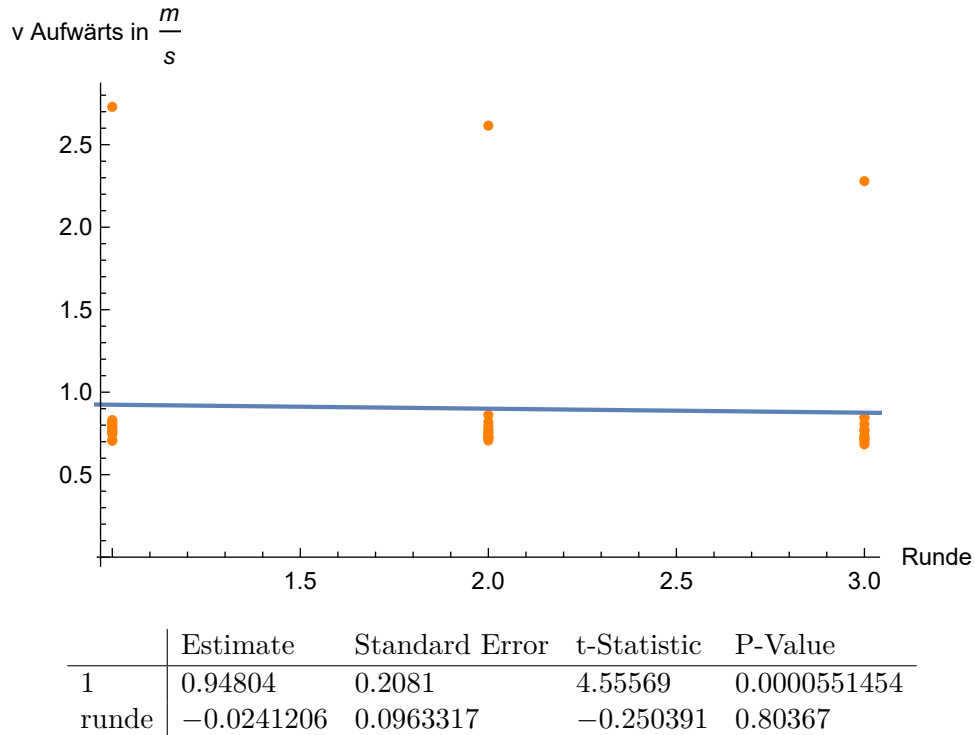


Abbildung 29: Abhängigkeit Rundennummer zur Treppengeschwindigkeit aufwärts. Messdaten (orange) mit ermittelter Regressionsgerade (blau).

$$v_{auf}(runde) = 0.940079 - 0.0241206runde \quad (19)$$

$$v_{ab}(runde) = 0.940079 + 0.0103279runde \quad (20)$$

In den Abbildungen 29 und 30 ist zu sehen, dass sich nach dem Modell die Treppengeschwindigkeit bei Änderung der Runde fast nicht ändert.

Ergebnisse der Plausibilisierung für den Aufstieg (Abbildung 29): Signifikanz liegt nicht vor, weil $p > \alpha$. Man nimmt die Nullhypothese an. Kein Einfluss von *runde* auf v_{auf} ist plausibel.

Ergebnisse der Plausibilisierung für den Abstieg (Abbildung 30): Signifikanz liegt vor, weil $p > \alpha$. Man nimmt die Nullhypothese an. Kein Einfluss von *runde* auf v_{ab} ist plausibel.

6.2 Mehrere Abhängigkeiten

Hier werden weitere vier lineare Gleichungen mit mehreren Parametern ermittelt.

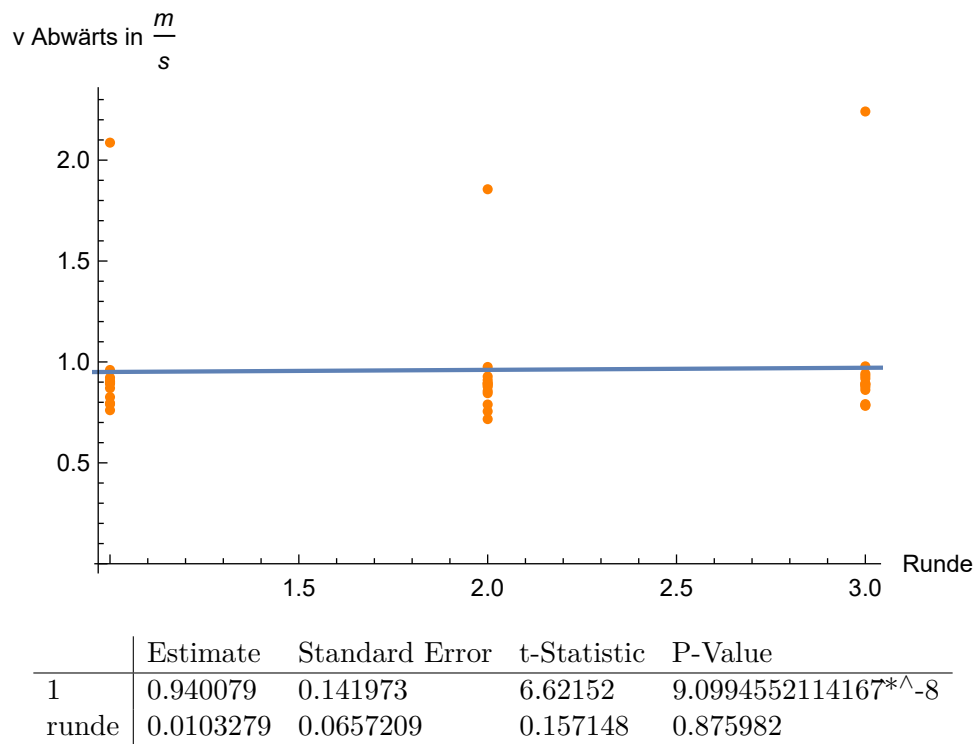


Abbildung 30: Abhängigkeit Rundenummer zur Treppengeschwindigkeit abwärts. Messdaten (orange) mit ermittelter Regressionsgerade (blau).

$$v_{auf}(v_{ebene}, groesse) = \beta_0 + \beta_1 v_{ebene} + \beta_2 groesse$$

$$v_{ab}(v_{ebene}, groesse) = \beta_0 + \beta_1 v_{ebene} + \beta_2 groesse$$

$$v_{auf}(v_{ebene}, groesse, runde) = \beta_0 + \beta_1 v_{ebene} + \beta_2 groesse + \beta_3 runde$$

$$v_{ab}(v_{ebene}, groesse, runde) = \beta_0 + \beta_1 v_{ebene} + \beta_2 groesse + \beta_3 runde$$

Für die Plausibilisierung der Regression wird die Nullhypothese $H_0 : \beta_1 = 0 \vee \beta_2 = 0$ bzw. $H_0 : \beta_1 = 0 \vee \beta_2 = 0 \vee \beta_3 = 0$ aufgestellt.

6.2.1 Ebenengeschwindigkeit und Größe

Für die Abhängigkeiten Wunschgeschwindigkeit in der Ebene und Körpergröße wurde der Zusammenhang (21) und (22) ermittelt.

$$v_{auf}(v_{ebene}, groesse) = -2.238127 + 1.93153v_{ebene} + 0.000532946groesse \quad (21)$$

$$v_{auf}(v_{ebene}, groesse) = -0.860154 + 1.27065v_{ebene} - 0.00101083groesse \quad (22)$$

In den Abbildungen 31 und 32 ist zu sehen, dass ein größerer Proband mit schnellerer Ebenengeschwindigkeit auch eine schnellere Treppengeschwindigkeit aufwärts erreicht. Eine schnellere Treppengeschwindigkeit abwärts wird durch einen Proband mit schnellerer Ebenengeschwindigkeit und kleinerer Größe erreicht. Eine Änderung von 50cm in der Größe wirkt sich auf das Besteigen aufwärts mit ca. 0.025m/s und abwärts mit ca. 0.05m/s aus.

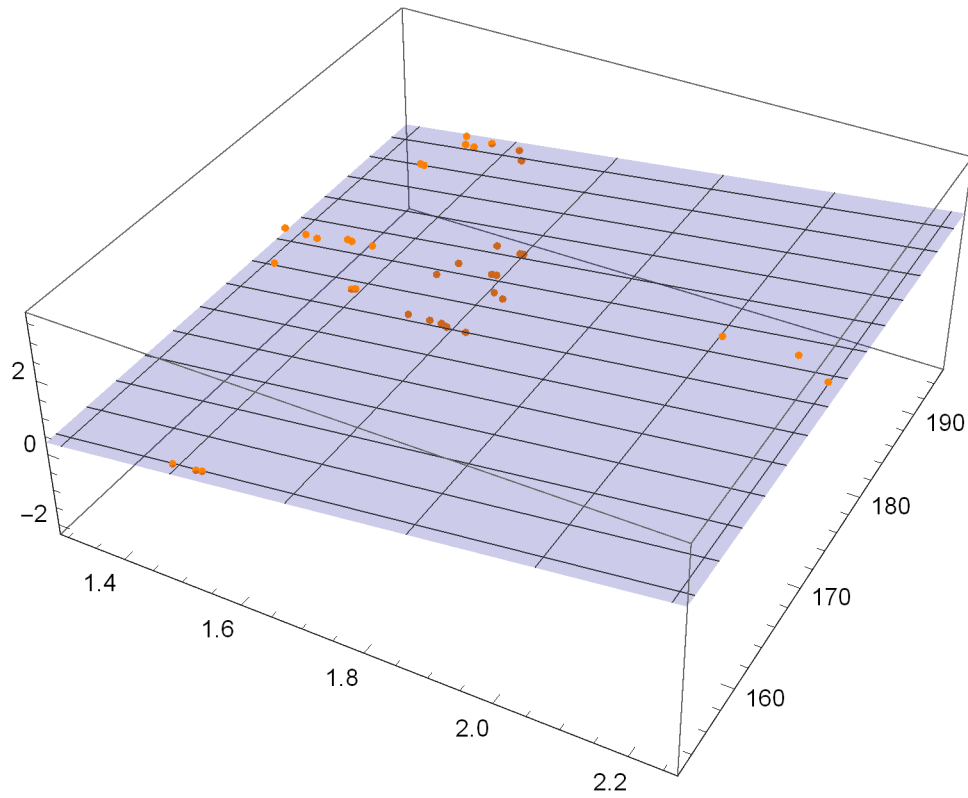
Ergebnisse der Plausibilisierung für den Aufstieg (Abbildung 31): Signifikanz liegt nicht vor, weil $p_{\beta_2} > \alpha$. Man nimmt die Nullhypothese an. Kein Einfluss von v_{ebene} und $groesse$ auf v_{auf} ist plausibel.

Ergebnisse der Plausibilisierung für den Abstieg (Abbildung 32): Signifikanz liegt nicht vor, weil $p_{\beta_2} > \alpha$. Man nimmt die Nullhypothese an. Kein Einfluss von v_{ebene} und $groesse$ auf v_{ab} ist plausibel.

6.2.2 Ebenengeschwindigkeit, Größe und Rundennummer

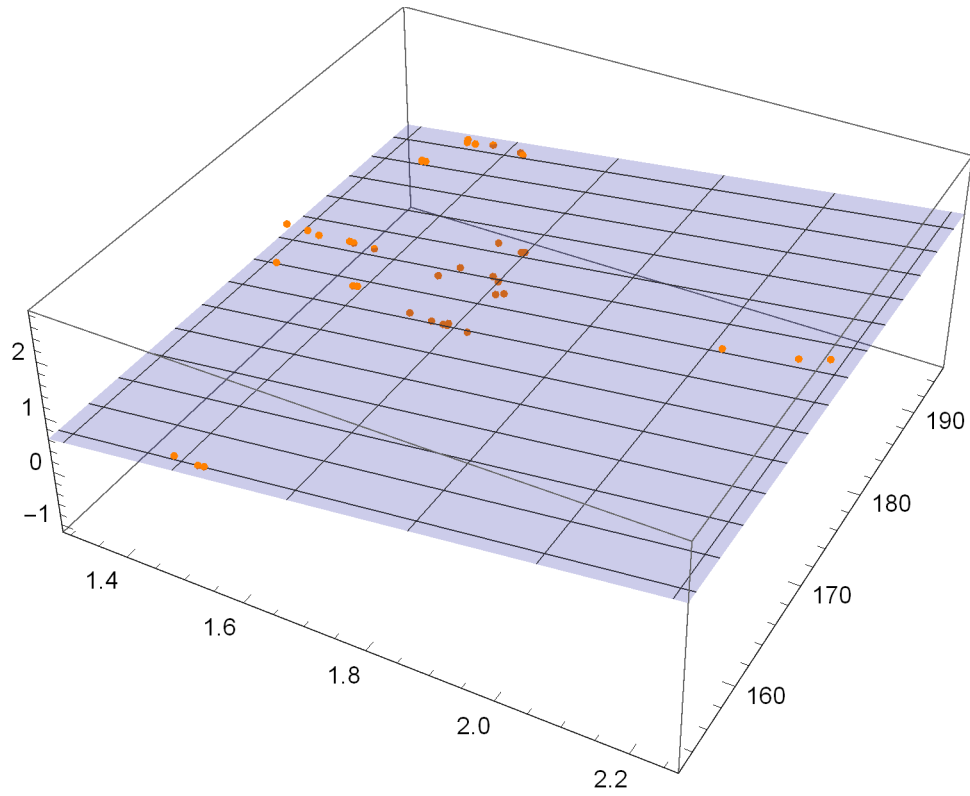
Für die Abhängigkeiten Wunschgeschwindigkeit in der Ebene, Körpergröße und Rundennummer wurde der Zusammenhang (23) und (24) ermittelt.

$$v_{auf}(v_{ebene}, groesse, runde) = -2.20269 + 1.93049v_{ebene} + 0.000528021groesse - 0.0164501runde \quad (23)$$



	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	-2.23812	0.892961	-2.5064	0.0168532
vEbene	1.93153	0.210102	9.1933	5.593268164880159* ⁻¹¹
größe	0.000532946	0.00421995	0.126292	0.900203

Abbildung 31: Abhängigkeiten Ebenengeschwindigkeit und Größe zur Treppengeschwindigkeit aufwärts. Messdaten (orange) mit ermittelter Regressionsebene (blau).



	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	−0.860154	0.641524	−1.3408	0.188386
vEbene	1.27065	0.150942	8.41815	4.997281571852699* ^{−10}
größe	−0.00101083	0.00303171	−0.33342	0.740752

Abbildung 32: Abhängigkeiten Ebenengeschwindigkeit und Größe zur Treppengeschwindigkeit abwärts. Messdaten (orange) mit ermittelter Regressionsebene (blau).

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	−2.20269	0.911611	−2.41626	0.0210343
vEbene	1.93049	0.212819	9.07104	1.0195983818002858 [*] -10
größe	0.000528021	0.004274	0.123543	0.902384
runde	−0.0164501	0.0531628	−0.309428	0.758831

Abbildung 33: Abhängigkeiten Ebenengeschwindigkeit, Größe und Runde zur Treppengeschwindigkeit aufwärts.

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	−0.893281	0.654301	−1.36525	0.180888
vEbene	1.27163	0.152749	8.32501	8.139962234647844 [*] -10
größe	−0.00100623	0.00306762	−0.328015	0.744854
runde	0.0153806	0.0381571	0.403085	0.689337

Abbildung 34: Abhängigkeiten Ebenengeschwindigkeit, Größe und Runde zur Treppengeschwindigkeit abwärts.

$$v_{auf}(v_{ebene}, groesse, runde) = -0.893281 + 1.27163v_{ebene} - 0.00100623groesse + 0.0153806runde \quad (24)$$

Ergebnisse der Plausibilisierung für den Aufstieg (Abbildung 33): Signifikanz liegt nicht vor, weil $p_{\beta_2} > \alpha$ und $p_{\beta_3} > \alpha$. Man nimmt die Nullhypothese an.

Ergebnisse der Plausibilisierung für den Abstieg (Abbildung 34): Signifikanz liegt nicht vor, weil $p_{\beta_2} > \alpha$ und $p_{\beta_3} > \alpha$. Man nimmt die Nullhypothese an.

7 Vergleich mit Daten aus 2012

8 Verbund von alten und neuen Daten

Unter der Annahme, dass die Bedingungen zum Zeitpunkt des Messexperiments im Jahr 2012 ähnlich waren wie im Jahr 2017, kann man die erfassten Daten aus beiden Experimenten zu einem gemeinsamen Datensatz zusammenfassen. Dies kann von Vorteil sein, da es sich insgesamt um mehr Teilnehmer handelt und so die Aussagekraft der Berechnungen erhöht wird. Es ist jedoch zu bedenken, dass folgende Faktoren die Aussagekraft verringern können. Zum einen hat eine Abweichung der Messbedingungen von 2012 zum Jahr 2017 direkten Einfluss auf die Messergebnisse. Zum Beispiel hat die

Treppenhöhe einen enormen Einfluss auf die Treppengeschwindigkeit. Darüber hinaus ist zu bemerken, dass unter Umständen in beiden Experimenten ein und dieselbe Person teilgenommen hat und unter unterschiedlicher Probanden ID geführt wird. Dies kann zum Beispiel bedeuten, dass es in den Datensätzen zwei Personen mit der gleichen Körpergröße gibt. Diese Doppelerfassung einer Person hat zur Folge, dass die betreffende Person die Auswertung mit mehr Gewicht beeinflusst. Für die weitere Auswertung wird angenommen, dass die Messbedingungen beider Experimente annähernd gleich sind und es durch die lange Zeit zwischen den beiden Experimenten keine Doppelfassungen von Personen gibt. Der Fokus liegt vor allem auf der Analyse der linearen Regression.

Es ist zu beachten, dass für alle Abbildungen und Gleichungen die Geschwindigkeiten in $\frac{m}{s}$ und die Größe in cm angegeben sind. Die Rundenzahl hat keine Einheit bzw. die Einheit 1.

8.1 Prüfung auf eine einfache Abhängigkeit

Zunächst wird die Abhängigkeit der Treppengeschwindigkeit von einem Parameter untersucht. Dabei werden jeweils die Parameter Wunschgeschwindigkeit in der Ebene, Größe und Rundenzahl beleuchtet. Mittels linearer Regression werden folgende Gleichungen ermittelt:

$$\begin{aligned}v_{auf}(v_{ebene}) &= \beta_0 + \beta_1 v_{ebene} \\v_{ab}(v_{ebene}) &= \beta_0 + \beta_1 v_{ebene} \\v_{auf}(groesse) &= \beta_0 + \beta_1 groesse \\v_{ab}(groesse) &= \beta_0 + \beta_1 groesse \\v_{auf}(runde) &= \beta_0 + \beta_1 runde \\v_{ab}(runde) &= \beta_0 + \beta_1 runde\end{aligned}$$

8.1.1 Wunschgeschwindigkeit in der Ebene

Aus der Erstellung eines linearen Regressionsmodells der Treppengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Wunschgeschwindigkeit in der Ebene ergeben sich folgende Gleichungen:

$$v_{auf}(v_{ebene}) = -0.908778 + 1.183660 v_{ebene} \quad (25)$$

$$v_{ab}(v_{ebene}) = -0.0207308 + 0.724824 v_{ebene} \quad (26)$$

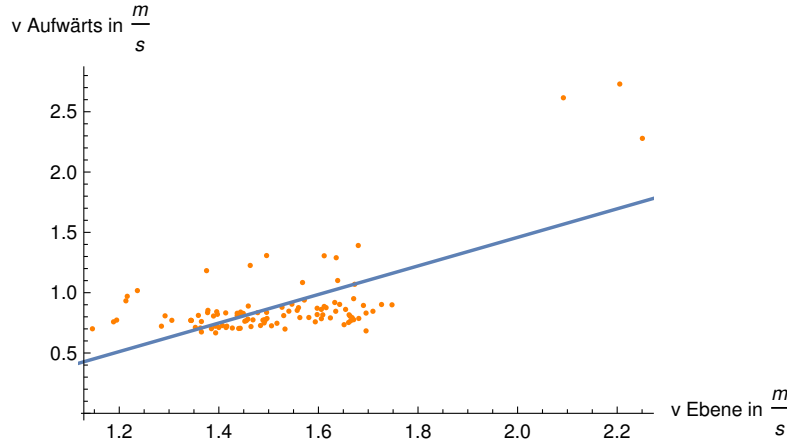
Die zugehörigen Abbildungen 35 und 36 zeigen, dass die Regressionsgerade in beiden Fällen eine positive Steigung aufweist. Die Steigung der Treppengeschwindigkeit beim Aufwärtsgehen der Treppen (Gleichung 25) ist höher als im Jahr 2017 (Gleichungen 1 und 2). Auch beim Abwärtsgehen ist die Regressionsgerade deutlich steiler als im Jahr 2017. In den Abbildungen 35 und 36 wird gezeigt, dass einige wenige Probanden

deutlich schneller sind als der Rest. Die Entfernung der Ausreißer aus der Analyse wie in Abbildungen 37 und 38 zu sehen ist, ergibt folgende Gleichungen:

$$v'_{auf}(v_{ebene}) = 0.44619 + 0.232299v_{ebene} \quad (27)$$

$$v'_{ab}(v_{ebene}) = 0.759833 + 0.191744v_{ebene} \quad (28)$$

Die Steigung der Regressionsgeraden ist deutlich geringer, wenn man die Ausreißer entfernt. Für die Plausibilisierung wird die Nullhypothese $H_0 : \beta_1 = 0$ aufgestellt. Das Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$. In beiden Fällen liegt Signifikanz vor, da der P-Wert $p < \alpha$ ist.



	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	-0.908778	0.203124	-4.474	0.0000198397
vEbene	1.18366	0.133097	8.89324	2.1219086124683187 ⁻¹⁴

Abbildung 35: Abhängigkeit der Wunschgeschwindigkeit in der Ebene und der Treppengeschwindigkeit aufwärts. Messdaten (orange) mit ermittelter Regressionsgeraden (blau)

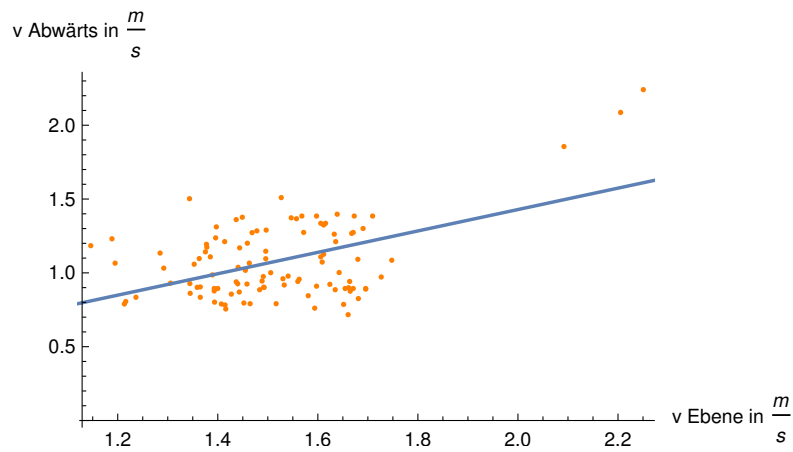
8.1.2 Körpergröße

Für die Abhängigkeit zu Körpergröße werden nur Daten ohne die zuvor genannten Ausreißer herangezogen. Da es beispielsweise Probanden gab, die gerannt sind, ist es nicht sinnvoll, diese in Beziehung zur Körpergröße zu setzen. Es wurde folgender Zusammenhang ermittelt:

$$v_{auf}(groesse) = 1.4018 - 0.00342982groesse \quad (29)$$

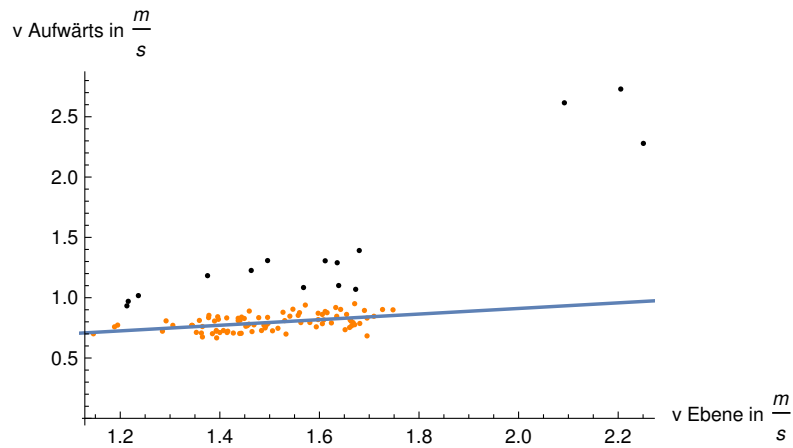
$$v_{ab}(groesse) = 1.85077 - 0.0045234groesse \quad (30)$$

Grafisch dargestellt wird dieser Zusammenhang in den Abbildungen 39 und 40. In den darunterliegenden Tabellen sind die Ergebnisse der Plausibilisierungstests zu sehen. Beim



	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	-0.0207308	0.193711	-0.107019	0.914982
vEbene	0.724824	0.126929	5.71048	1.096185703891783* ⁻⁷

Abbildung 36: Abhängigkeit der Wunschgeschwindigkeit in der Ebene und der Treppengeschwindigkeit abwärts. Messdaten (orange) mit ermittelter Regressionsgeraden (blau)



	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	0.44619	0.0711755	6.26887	1.313544602470619* ⁻⁸
vEbene	0.232299	0.0473377	4.90727	4.2073786767420134* ⁻⁶

Abbildung 37: Abhängigkeit der Wunschgeschwindigkeit in der Ebene und der Treppengeschwindigkeit aufwärts. Messdaten (orange) und Ausreißer (schwarz) mit ermittelter Regressionsgeraden (blau)

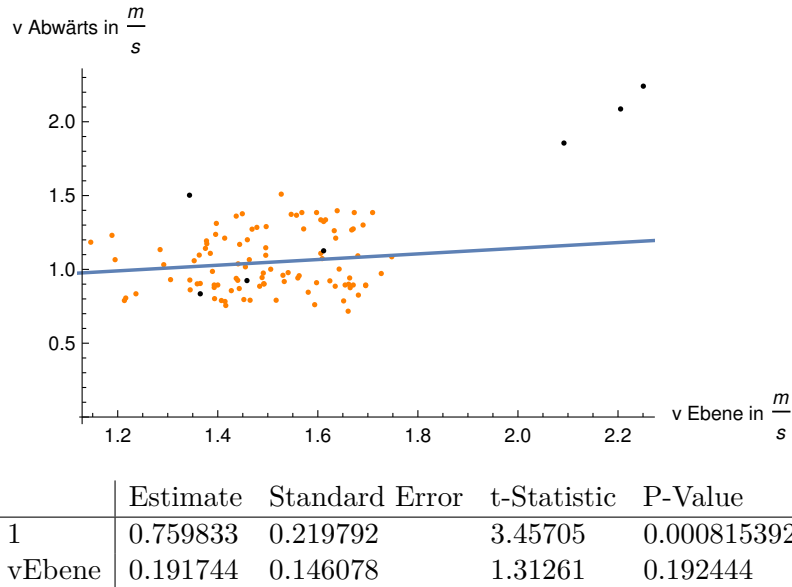


Abbildung 38: Abhängigkeit der Wunschgeschwindigkeit in der Ebene und der Treppengeschwindigkeit abwärts. Messdaten (orange) und Ausreißer (schwarz) mit ermittelter Regressionsgeraden (blau)

Treppenaufstieg ist der P-Wert $p < \alpha$. Signifikanz liegt vor und die Nullhypothese wird abgelehnt. Die Körpergröße hat beim Aufstieg einen direkten Einfluss auf die Treppengeschwindigkeit. Beim Abstieg ist der P-Wert nur geringfügig größer als das Signifikanzniveau α . Es ist also anzunehmen, dass die Körpergröße beim Abstieg keine Auswirkung auf die Treppengeschwindigkeit hat. Diese Erkenntnis ist plausibel, da beim Aufstieg die Beinlänge eine bedeutendere Rolle spielt als beim Abstieg. Interessant ist die Tatsache, dass beide Regressionsgeraden eine negative Steigung haben. Je größer ein Proband, desto niedriger ist die Geschwindigkeit beim Treppensteigen.

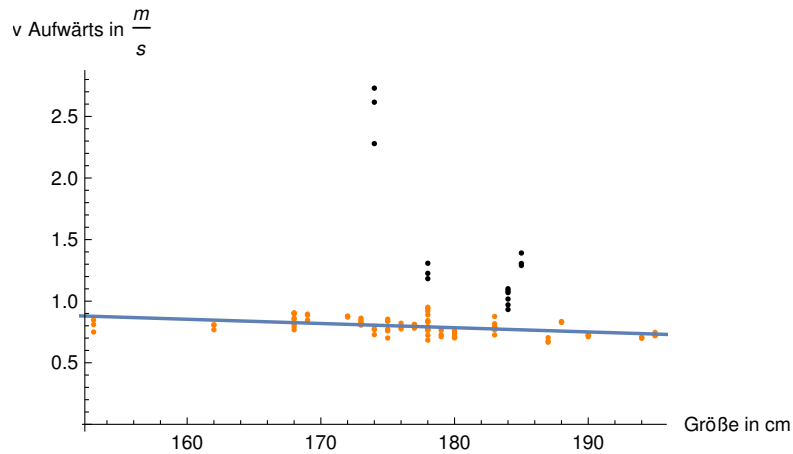
8.1.3 Rundennummer

Auch für die Abhängigkeit zur Rundennummer wurden die Ausreißer entfernt. Folgender Zusammenhang wurde ermittelt:

$$v_{auf}(runde) = 0.800529 - 0.00319011runde \quad (31)$$

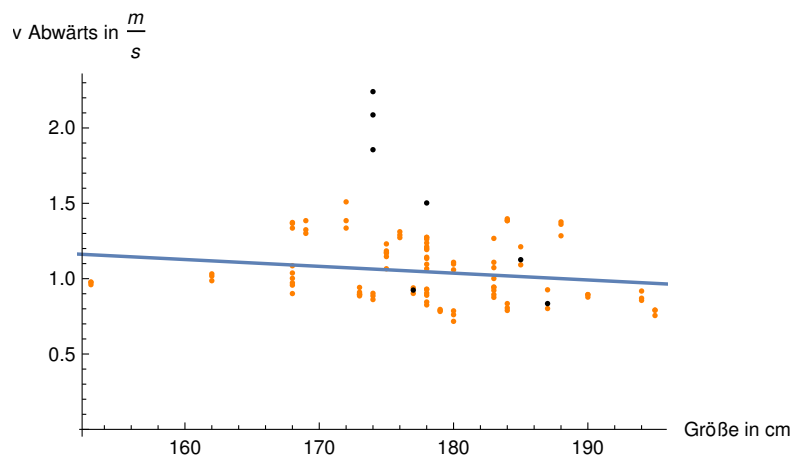
$$v_{ab}(runde) = 1.03894 + 0.00414082runde \quad (32)$$

Die grafische Darstellung für diesen Zusammenhang ist für den Treppenaufstieg in Abbildung 41 und für den Treppenabstieg in Abbildung 42 zu sehen. Die Abbildungen machen bereits deutlich, dass eine Abhängigkeit der Treppengeschwindigkeit von der Rundenzahl nicht plausibel ist. Die Ergebnisse der Plausibilitätsprüfung in den Tabellen



	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	1.4018	0.124845	11.2283	$1.1285006939844225 \times 10^{-18}$
größe	-0.00342982	0.00070381	-4.87322	$4.8200669836621545 \times 10^{-6}$

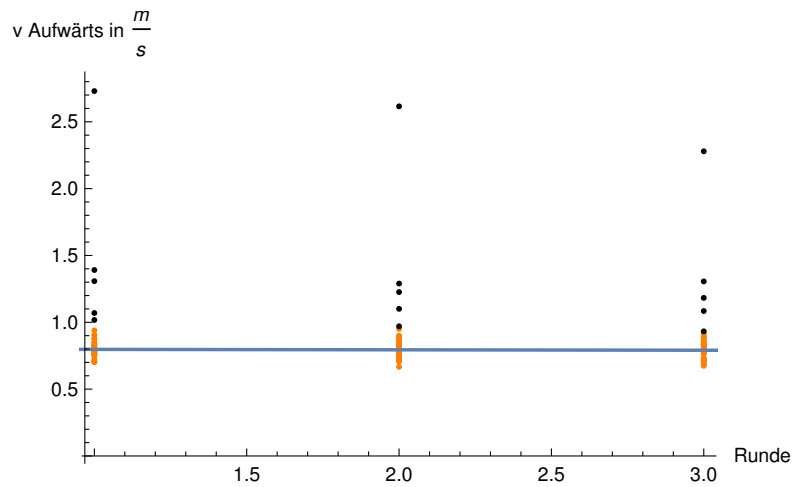
Abbildung 39: Abhängigkeit der Körpergröße und der Treppengeschwindigkeit aufwärts. Messdaten (orange) und Ausreißer (schwarz) mit ermittelter Regressionsgeraden (blau)



	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	1.85077	0.410065	4.51337	0.0000181049
größe	-0.0045234	0.00230541	-1.96208	0.0526486

Abbildung 40: Abhängigkeit der Körpergröße und der Treppengeschwindigkeit abwärts. Messdaten (orange) und Ausreißer (schwarz) mit ermittelter Regressionsgeraden (blau)

jeweils unter den Abbildungen zeigen, dass der P-Wert in beiden Fällen deutlich über dem Signifikanzniveau α liegt. Die Nullhypothese wird angenommen, die Rundenzahl hat keinen Einfluss auf die Treppengeschwindigkeit.



	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	0.800529	0.018439	43.4149	3.24478746847039 [*] -61
runde	-0.00319011	0.00853561	-0.373742	0.709495

Abbildung 41: Abhängigkeit der Runde und der Treppengeschwindigkeit aufwärts. Messdaten (orange) und Ausreißer (schwarz) mit ermittelter Regressionsgeraden (blau)

8.2 Prüfung auf mehrere Abhängigkeiten

Es wird die Abhängigkeit der Treppengeschwindigkeit von mehreren Parametern untersucht. Mittels linearer Regression werden folgende Gleichungen ermittelt:

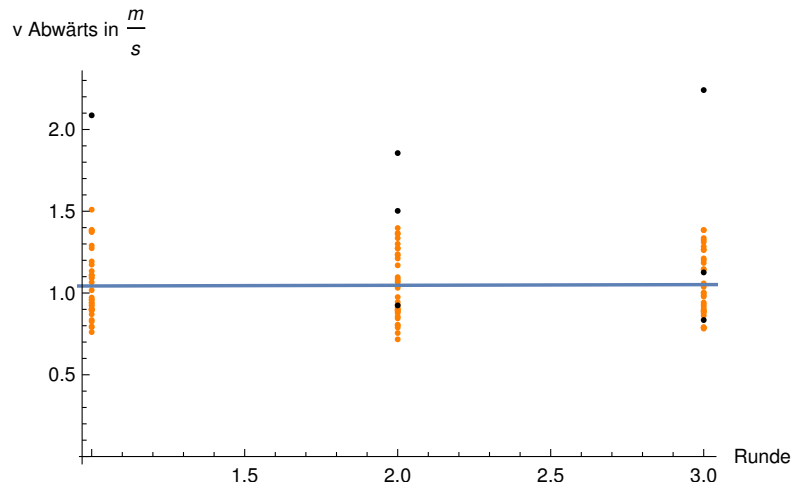
$$v_{auf}(v_{ebene}, groesse) = \beta_0 + \beta_1 v_{ebene} + \beta_2 groesse$$

$$v_{ab}(v_{ebene}, groesse) = \beta_0 + \beta_1 v_{ebene} + \beta_2 groesse$$

$$v_{auf}(v_{ebene}, groesse, runde) = \beta_0 + \beta_1 v_{ebene} + \beta_2 groesse + \beta_3 runde$$

$$v_{ab}(v_{ebene}, groesse, runde) = \beta_0 + \beta_1 v_{ebene} + \beta_2 groesse + \beta_3 runde$$

Auch hier werden die Ausreißer vor der Berechnung entfernt. In den Abbildungen sind die Ausreißer schwarz dargestellt. Analog zu den vorherigen Kapiteln wird eine Nullhypothese $H_0 : \beta_1 = 0, \beta_2 = 0, \beta_3 = 0$ aufgestellt und eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt. Das Signifikanzniveau α wird mit 0,05 definiert.



	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	1.03894	0.0527913	19.68	1.832714315673885 ⁻³⁵
runde	0.00414082	0.024636	0.16808	0.866874

Abbildung 42: Abhängigkeit der Runde und der Treppengeschwindigkeit abwärts. Messdaten (orange) und Ausreißer (schwarz) mit ermittelter Regressionsgeraden (blau)

8.2.1 Lineare Regression mit zwei Parametern

Bei der Erstellung eines linearen Regressionsmodells der Treppengeschwindigkeit in Abhängigkeit von Ebenengeschwindigkeit und Körpergröße ergibt sich folgender Zusammenhang:

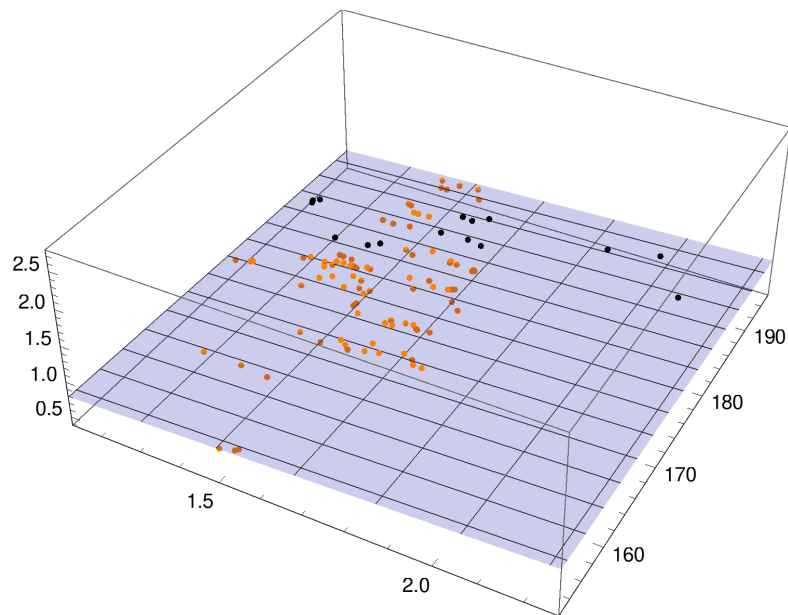
$$v_{auf}(v_{ebene}, groesse) = 1.0165 - 0.00294506groesse + 0.199894v_{ebene} \quad (33)$$

$$v_{ab}(v_{ebene}, groesse) = 1.55685 - 0.00417799groesse + 0.155209v_{ebene} \quad (34)$$

Grafisch dargestellt ergibt dies eine Fläche wie in Abbildungen 43 und 44 zu sehen ist. Die Plausibilitätsprüfung ergibt für den Aufstieg eine Abhängigkeit der Treppengeschwindigkeit von den Parametern Wunschgeschwindigkeit in der Ebene und der Größe. Für den Treppenabstieg wird die Nullhypothese angenommen, da der P-Wert über dem Signifikanzniveau liegt. Die Treppengeschwindigkeit beim Abstieg ist nicht von den Parameter Ebenengeschwindigkeit und Größe abhängig.

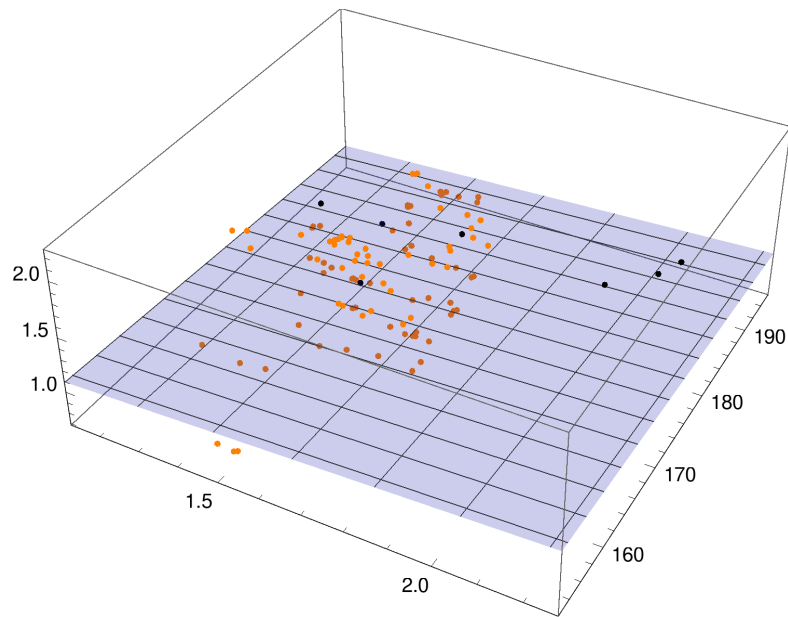
8.2.2 Lineare Regression mit drei Parametern

Bei der Erstellung eines linearen Regressionsmodells der Treppengeschwindigkeit in Bezug zu Ebenengeschwindigkeit, Körpergröße und Rundenzahl ergibt sich folgender



	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	1.0165	0.140132	7.25384	$1.5820003769083974 \times 10^{-10}$
vEbene	0.199894	0.0433176	4.61461	0.0000134806
größe	-0.00294506	0.000643082	-4.5796	0.0000154292

Abbildung 43: Abhängigkeit der Ebenengeschwindigkeit, der Größe und der Treppengeschwindigkeit aufwärts. Messdaten (orange) und Ausreißer (schwarz) mit ermittelter Regressionsfläche (blau)



	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	1.55685	0.494165	3.15047	0.00218015
vEbene	0.155209	0.145841	1.06423	0.28992
größe	-0.00417799	0.00232656	-1.79578	0.0757093

Abbildung 44: Abhängigkeit der Ebenengeschwindigkeit, der Größe und der Treppengeschwindigkeit abwärts. Messdaten (orange) und Ausreißer (schwarz) mit ermittelter Regressionsfläche (blau)

Zusammenhang:

$$v_{auf}(v_{ebene}, groesse, runde) = 1.02175 - 0.00294612groesse - 0.00220598runde + 0.199456v_{ebene} \quad (35)$$

$$v_{ab}(v_{ebene}, groesse, runde) = 2.17485 - 0.0057147groesse + 0.00132958runde - 0.0829226v_{ebene} \quad (36)$$

Eine sinnvolle grafische Abbildung dieses Zusammenhangs ist leider nicht möglich. Eine Plausibilitätsprüfung ergibt folgende Ergebnisse für den Aufstieg:

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	1.02175	0.141808	7.20516	2.0796256283741107 ^{*^} -10
runde	-0.00220598	0.00687228	-0.320996	0.748992
vEbene	0.199456	0.0435639	4.57847	0.0000156847
größe	-0.00294612	0.000646431	-4.55752	0.0000169973

Vor allem im Bezug auf die Rundenzahl ergibt sich ein P-Wert deutlich höher als das Signifikanzniveau α . Der P-Wert in Bezug auf die Ebenengeschwindigkeit und die Körpergröße liegt unter dem Signifikanzniveau.

Für den Abstieg ergibt sich folgende Plausibilitätsprüfung:

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	2.17485	0.524033	4.15021	0.0000778315
runde	0.00132958	0.0253956	0.0523546	0.958368
vEbene	-0.0829226	0.160985	-0.515096	0.607807
größe	-0.0057147	0.0023888	-2.39229	0.0189218

Beim Treppenabstieg ist der P-Wert nur in Bezug auf die Körpergröße unter dem Signifikanzniveau α .

9 Fazit