**Multivariate Analyse der Faktoren, die die Heilungsdauer bei Polytrauma-Patienten beeinflussen**

**Projektübersicht**  
Dieses Dokument bietet eine umfassende Dokumentation der multivariaten Analyse, die durchgeführt wurde, um die Faktoren zu identifizieren, die die Heilungsdauer bei Polytrauma-Patienten beeinflussen. Die Analyse baut auf den univariaten Ergebnissen auf und untersucht, wie mehrere Faktoren zusammenwirken, um die Genesungszeit zu beeinflussen. Sowohl Regressionsmodelle als auch Überlebensanalysen wurden implementiert, um ergänzende Perspektiven auf die Daten zu bieten.

**1. Ziel und Umfang**  
Die multivariate Analyse hatte folgende Ziele:

* Ermitteln, welche Faktoren signifikant bleiben, wenn andere kontrolliert werden
* Quantifizierung der kombinierten Wirkung mehrerer Verletzungsarten
* Entwicklung von prädiktiven Modellen für die Heilungsdauer
* Untersuchung von Zeit-bis-Ereignis-Mustern mittels Überlebensanalyse

**2. Datenquelle und -aufbereitung**

**2.1 Quelldaten**

* Patientendatensatz, erstellt während der univariaten Analysephase
* 30 einzigartige Patienten mit Informationen zu Verletzungsarten, Demographie und Heilungsdauer
* Struktur: Eine Zeile pro Patient (statt pro Besuch)

**2.2 Schlüsselvariablen**

* **Abhängige Variable:** Heilungsdauer (Heilungsdauer in Tagen)
* **Unabhängige Variablen:**
  + Verletzungen an Körperteilen (Kopf, Abdomen, Wirbelsäule, Arm, etc.)
  + Demographische Daten (Alter)
  + Besuchsinformationen (Anzahl\_Besuche)

**2.3 Definition und Transformation der Variablen**

* **Heilungsdauer:** Tage vom Unfall bis zum letzten erfassten Besuch
* **Verletzungsvariablen:** Binäre Indikatoren (1/0 oder Ja/Nein) für jeden Körperteil
* **Alter:** Alter des Patienten zum Zeitpunkt des Unfalls
* **Alter\_quadrat:** Quadrat des Alters (um mögliche nicht-lineare Effekte zu erfassen)

**3. Methodik**

**3.1 Analyseansätze**  
Zwei komplementäre Analyseansätze wurden umgesetzt:

* **Multiple lineare Regression:**
  + Modelle mit zunehmender Komplexität
  + Fokus auf Vorhersage und Quantifizierung der Effekte
* **Überlebensanalyse:**
  + Kaplan-Meier-Kurven zur Visualisierung
  + Cox-Proportional-Hazards-Modellierung zur Berechnung der Hazard Ratios

**3.2 Regressionsmodelle**  
Drei zunehmend komplexe Regressionsmodelle wurden erstellt:

* **Modell 1:** Umfasste nur die zwei in der univariaten Analyse signifikanten Faktoren  
  *Heilungsdauer ~ Abdomen + Kopf*
* **Modell 2:** Hinzugefügt wurden fast signifikante Faktoren aus der univariaten Analyse  
  *Heilungsdauer ~ Abdomen + Kopf + Wirbelsäule + Arm*
* **Modell 3:** Alter mit quadratischem Term wurde hinzugefügt, um nicht-lineare Effekte zu erfassen  
  *Heilungsdauer ~ Abdomen + Kopf + Wirbelsäule + Arm + Alter + Alter\_quadrat*

**3.3 Rahmen der Überlebensanalyse**

* **Ereignisdefinition:** „Genesung“ definiert als Erreichen des letzten Besuchs
* **Zeitvariable:** Heilungsdauer (Tage vom Unfall bis zum letzten Besuch)
* **Ereignisindikator:** Alle auf 1 gesetzt (alle Patienten haben den letzten Besuch erreicht)
* **Kaplan-Meier-Schätzung:** Zur visuellen Gegenüberstellung der Verletzungsgruppen
* **Cox-Proportional-Hazards-Modell:** Zur Quantifizierung des Einflusses der Faktoren auf die „Genesungsrate“

**3.4 Annahmen**

*Annahmen der Regression:*

* Lineare Beziehung zwischen Prädiktoren und Ergebnis
* Unabhängigkeit der Beobachtungen
* Homoskedastizität (gleiche Varianz der Fehler)
* Normale Verteilung der Residuen

*Annahmen der Überlebensanalyse:*

* Proportional Hazards (der Einfluss der Variablen bleibt über die Zeit konstant)
* Unabhängigkeit der Beobachtungen
* Der letzte Besuch repräsentiert den Abschluss des Genesungsprozesses

*Allgemeine Annahmen:*

* Binäre Verletzungsvariablen erfassen ausreichend das Vorhandensein bzw. Nichtvorhandensein von Verletzungen
* Die 30 Patienten stellen eine aussagekräftige Stichprobe von Polytrauma-Fällen dar
* Es gibt keine systematischen Verzerrungen in den Nachbeobachtungsmustern

**4. Ergebnisse**

**4.1 Regressionsmodelle**

* **Modell 1: Basis-Modell mit signifikanten univariaten Faktoren**
  + R²: 0,419 (41,9 % der Varianz erklärt)
  + Angepasstes R²: 0,376
  + **Signifikante Prädiktoren:**
    - Abdomen: +285,51 Tage (p = 0,0054)
    - Kopf: –191,96 Tage (p = 0,0233)
* **Modell 2: Erweitertes Modell mit zusätzlichen Faktoren**
  + R²: 0,545 (54,5 % der Varianz erklärt)
  + Angepasstes R²: 0,472
  + **Signifikante Prädiktoren:**
    - Abdomen: +339,71 Tage (p = 0,0010)
    - Wirbelsäule: –186,75 Tage (p = 0,0383)
    - Kopf: –110,06 Tage (p = 0,1805) – nicht mehr signifikant
* **Modell 3: Vollständiges Modell mit Alterseffekten**
  + R²: 0,553 (55,3 % der Varianz erklärt)
  + Angepasstes R²: 0,436
  + **Signifikante Prädiktoren:**
    - Abdomen: +321,55 Tage (p = 0,0041)
    - Wirbelsäule: –167,80 Tage (p = 0,0858) – grenzwertig signifikant

**4.2 Ergebnisse der Überlebensanalyse**

*Kaplan-Meier-Analyse*

* Die Visualisierung zeigte eine deutliche Trennung zwischen Patienten mit und ohne Bauchverletzungen.
* Patienten mit Bauchverletzungen hatten durchgehend längere Zeiten bis zur „Genesung“.
* Die Kurven der Wirbelsäulenverletzungen zeigten im Vergleich zu Patienten ohne Wirbelsäulenverletzungen schnellere „Genesungszeiten“.

*Cox-Proportional-Hazards-Modell*

* Konkordanzindex: 0,738 (gute Diskriminierung)
* Log-Likelihood-Ratio-Test p-Wert: 0,0003 (hoch signifikantes Modell)
* **Signifikante Faktoren:**
  + Abdomen: HR = 0,16 (95%-KI: 0,05–0,52, p = 0,0025)
    - *Interpretation:* 84 % niedrigere „Genesungsrate“ (längere Heilungsdauer)
  + Wirbelsäule: HR = 3,68 (95%-KI: 1,03–13,14, p = 0,0448)
    - *Interpretation:* 268 % höhere „Genesungsrate“ (kürzere Heilungsdauer)

**4.3 Modellvergleich und Auswahl**

* Modell 2 wies das höchste angepasste R² (0,472) auf, was auf das beste Gleichgewicht zwischen Erklärungswert und Sparsamkeit hindeutet.
* Der Konkordanzindex des Cox-Modells (0,738) deutet auf eine gute Vorhersageleistung hin.
* Die Ergebnisse der Regressions- und Überlebensanalyse zeigten konsistente Muster.

**5. Wichtige Erkenntnisse und Interpretation**

**5.1 Bestätigter Effekt von Bauchverletzungen**

* **Ergebnis:** Bauchverletzungen verlängern die Heilungsdauer signifikant um ca. 322–340 Tage.
* **Konsistenz:** Dieser Effekt blieb in allen Modellen und Analyseansätzen robust.
* **Signifikanz:** Der Effekt war in allen Modellen hoch signifikant (p < 0,01).
* **HR im Cox-Modell:** 0,16, was auf eine deutlich reduzierte „Genesungsrate“ hinweist.

**5.2 Konterintuitive Befunde bei Wirbelsäulenverletzungen**

* **Ergebnis:** Wirbelsäulenverletzungen waren mit kürzeren Heilungsdauern von ca. 167–187 Tagen assoziiert.
* **Auftreten:** Dieser Effekt wurde erst in den multivariaten Modellen signifikant.
* **HR im Cox-Modell:** 3,68, was auf eine schnellere „Genesungsrate“ hinweist.
* **Interpretation:** Mögliche Erklärungen beinhalten:
  + Intensivere oder spezialisierte Behandlungsprotokolle bei Wirbelsäulenverletzungen
  + Störfaktoren, die im Datensatz nicht erfasst wurden
  + Unterschiedliche Nachbeobachtungsmuster bei Patienten mit Wirbelsäulenverletzungen

**5.3 Abnehmende Signifikanz von Kopfverletzungen**

* **Ergebnis:** Kopfverletzungen verloren an statistischer Signifikanz, wenn andere Faktoren berücksichtigt wurden.
* **Muster:** Der Effekt verringerte sich von Modell 1 (–192 Tage, p = 0,023) zu Modell 2 (–110 Tage, p = 0,181).
* **Interpretation:** Die Effekte von Kopfverletzungen könnten teilweise durch andere Verletzungsarten verfälscht werden.

**5.4 Alterseffekte**

* **Ergebnis:** Weder lineare noch quadratische Alterstermine erreichten statistische Signifikanz.
* **Beobachtung:** Nicht-signifikanter positiver linearer Term (2,43 Tage/Jahr) und negativer quadratischer Term (–0,04).
* **Interpretation:** Die in der univariaten Analyse beobachteten Alterseffekte könnten durch Verletzungsmuster erklärt werden.

**6. Erstellte Visualisierungen**

* **Vergleich der Regressionskoeffizienten:** Balkendiagramm, das die Koeffizienten-Größe und Signifikanz über die Modelle hinweg zeigt.
* **Tatsächliche vs. vorhergesagte Heilungsdauer:** Streudiagramm mit R² = 0,553, das die Modellanpassung zeigt.
* **Kaplan-Meier-Kurven nach Verletzungsart:**
  + Gesamte Überlebenskurve
  + Kurven für Abdomen (Ja/Nein)
  + Kurven für Kopf (Ja/Nein)
  + Kurven für Wirbelsäule (Ja/Nein)
  + Kurven für Arm (Ja/Nein)
* **Hazard Ratios des Cox-Modells:** Wald-Diagramm mit 95%-Konfidenzintervallen.

**7. Einschränkungen**

* **Stichprobengröße:** Beschränkt auf 30 Patienten, was die statistische Aussagekraft einschränkt.
* **Definition der Heilungsdauer:** Basierend auf dem letzten Besuch anstelle der klinischen Genesung.
* **Multikollinearität:** Potenzielle Korrelation zwischen den Verletzungsarten.
* **Fehlende Variablen:** Andere nicht erfasste Faktoren könnten die Heilungsdauer beeinflussen.
* **Generaliserbarkeit:** Die Ergebnisse repräsentieren möglicherweise nicht alle Polytrauma-Populationen.

**8. Erledigungsstatus im Analyseplan**

*Abgeschlossene Schritte:*

* **Definition der Heilungsdauer-Metrik:** Erfolgreich umgesetzt unter Verwendung der Tage vom Unfall bis zum letzten Besuch.
* **Univariate Analyse der Verletzungen der Körperteile:** In der vorherigen Phase abgeschlossen.
* **Analyse demographischer Faktoren:** Alter und dessen nicht-lineare Effekte wurden analysiert.
* **Multiple Regressionsmodelle:** Erfolgreich mit zunehmender Komplexität umgesetzt.
* **Überlebensanalyse:** Kaplan-Meier-Kurven und Cox-Proportional-Hazards-Modell implementiert.

*Noch nicht abgeschlossene Schritte:*

* **Analyse von Zeitintervallen:** Untersuchung von Problemen, die in bestimmten Zeiträumen identifiziert wurden.
* **Zeitbasierte Analyse:** Detaillierte Analyse des Behandlungszeitplans.
* **Analyse des kritischen Verletzungsimpact:** Weitere detaillierte Analyse spezifischer Verletzungsarten.
* **Analyse der beruflichen Wiedereingliederung:** Analyse der Ergebnisse des Arbeitsstatus.

**9. Nächste Schritte**

**9.1 Zeitbasierte Analyse**

* Untersuchung des Zusammenhangs zwischen dem Zeitpunkt des ersten Besuchs und der gesamten Heilungsdauer.
* Überprüfung, ob eine frühzeitige Intervention mit einer kürzeren Heilungsdauer korreliert.
* Berechnung der durchschnittlichen Zeit zwischen den Besuchen für jeden Patienten und Überprüfung der Korrelation mit der Heilungsdauer.

**9.2 Analyse der beruflichen Wiedereingliederung**

* Analyse der Heilungsdauer für Patienten mit unterschiedlichen Ergebnissen des Arbeitsstatus.
* Vergleich der Heilungsdauer zwischen Fällen, die in den Abschlussberichten als „arbeitsfähig“ vs. „arbeitsunfähig“ gekennzeichnet sind.
* Untersuchung, ob Maßnahmen der beruflichen Rehabilitation mit der Heilungsdauer korrelieren.

**9.3 Entwicklung eines Vorhersage-Tools**

* Erstellung eines benutzerfreundlichen Tools (z. B. Tabellenkalkulation oder Webanwendung).
* Implementierung des besten prädiktiven Modells (Modell 2).
* Ermöglichung der Eingabe von Patientenmerkmalen zur Schätzung der Heilungsdauer.

**10. Technische Umsetzung**

Die Analyse wurde in Python unter Verwendung der folgenden Bibliotheken umgesetzt:

* **pandas:** Zur Datenmanipulation
* **statsmodels:** Für die Regressionsmodellierung
* **lifelines:** Für die Überlebensanalyse
* **matplotlib/seaborn:** Für die Visualisierungen

**11. Fazit**

Die multivariate Analyse hat wertvolle Einblicke in die Faktoren geliefert, die die Heilungsdauer bei Polytrauma-Patienten beeinflussen, und erklärt dabei etwa 55 % der Varianz. Bauchverletzungen erwiesen sich als der konsistenteste Prädiktor für eine verlängerte Heilungsdauer, während Wirbelsäulenverletzungen eine unerwartete Assoziation mit kürzeren Heilungsdauern zeigten. Diese Ergebnisse haben wichtige Implikationen für die Patientenversorgung, die Ressourcenallokation und die Rehabilitationsplanung.  
Die nächste Phase der Analyse sollte sich auf zeitliche Aspekte der Genesung sowie auf berufliche Ergebnisse konzentrieren, um das Verständnis des Genesungsprozesses bei Polytrauma-Patienten weiter zu vertiefen.