**Einführung: Oxidativer Stress & Long-Covid/Post-Vac/ME/CFS**

Long-COVID und Post-Vac betreffen viele Menschen weltweit und führen zu einer Vielzahl von Symptomen wie anhaltender Erschöpfung (Fatigue), Konzentrationsproblemen, Schmerzen und weiteren Beschwerden. Die genauen Ursachen sind komplex und multifaktoriell. Eine Hypothese, die zunehmend an Aufmerksamkeit gewinnt, ist die Rolle von oxidativem Stress. Doch was bedeutet das eigentlich? Oxidativer Stress entsteht, wenn im Körper ein Ungleichgewicht zwischen der Produktion reaktiver Sauerstoffmoleküle und den schützenden Antioxidantien vorliegt. Dieses Ungleichgewicht könnte viele der beobachteten Symptome erklären.

**Einfach erklärt: Was ist oxidativer Stress?**

Unser Körper ist ein komplexes Netzwerk von chemischen Reaktionen, die uns Energie liefern, unser Immunsystem stärken und unsere Gesundheit aufrechterhalten. Dabei entstehen sogenannte freie Radikale. Das sind hochreaktive Moleküle, die im Rahmen normaler Stoffwechselprozesse entstehen. Eines dieser Moleküle ist Wasserstoffperoxid (H₂O₂).

**Was ist Wasserstoffperoxid?**

Wasserstoffperoxid ist eine chemische Verbindung, die der Körper nutzt, um Krankheitserreger wie Viren und Bakterien zu bekämpfen. Im Vergleich zu anderen reaktiven Sauerstoffspezies wie Superoxid oder Hydroxylradikalen ist Wasserstoffperoxid stabiler und kann leichter durch Enzyme wie Katalase abgebaut werden. Dennoch bleibt es hochreaktiv und kann in hohen Konzentrationen zellschädigend wirken. Es funktioniert wie ein „biologisches Desinfektionsmittel“. In geringen Mengen ist H₂O₂ hilfreich, aber eine Überproduktion kann Zellen und Gewebe schädigen.

**Was sind Antioxidantien?**

Antioxidantien sind Moleküle, die freie Radikale neutralisieren und so Schäden verhindern. Zu den wichtigsten Antioxidantien gehören:

* **Vitamin C**: Neutralisiert freie Radikale und stärkt das Immunsystem.
* **Vitamin E**: Schützt die Zellmembranen vor oxidativen Schäden.
* **Glutathion**: Das zentrale Antioxidans des Körpers, das in der Leber eine Schlüsselrolle spielt.
* **Coenzym Q10**: Unterstützt die Mitochondrien bei der Energieproduktion und schützt vor oxidativem Stress.
* **Selen**: Ein essentielles Spurenelement, das antioxidative Enzyme unterstützt.
* **Niacin (Vitamin B3)**: Unterstützt die Funktion der Mitochondrien und ist essenziell für den Zellstoffwechsel. Ein Niacinmangel kann zu schweren Symptomen wie Fatigue und kognitiven Problemen führen.

Wenn der Körper nicht genug Antioxidantien bereitstellen kann, entsteht oxidativer Stress. Dieser Zustand kann Zellen schädigen, Entzündungen fördern und die Funktion von Organen und Gewebe beeinträchtigen.

**Warum könnte oxidativer Stress bei Long-COVID und Post-Vac eine Rolle spielen?**

1. **Entzündungen durch COVID-19 oder die Impfung:**
   * Die Immunantwort auf das Virus oder das Spike-Protein kann eine Überproduktion freier Radikale auslösen.
2. **Erschöpfung der Antioxidantien:**
   * Langanhaltende Entzündungen können die antioxidativen Reserven des Körpers aufbrauchen, wodurch freie Radikale unkontrolliert agieren.
3. **Langfristige Schäden:**
   * Chronischer oxidativer Stress kann die Energieproduktion in den Mitochondrien beeinträchtigen und Symptome wie Fatigue und Muskelschwäche hervorrufen.
4. **Reaktivierung latenter Viren:**
   * Durch eine geschwächte Immunantwort können Viren wie Epstein-Barr (EBV) reaktiviert werden, was die Symptome verschlimmert.
5. **Genetische Prädisposition:**
   * Einige Menschen könnten genetisch bedingt anfälliger für oxidativen Stress sein. Besonders Frauen könnten durch zyklische Entzündungen während der Menstruation stärker betroffen sein. Wiederholte Entzündungen könnten das antioxidative System überfordern und langfristige Schäden begünstigen sowie genetische Mutationen begünstigen.
   * Oftmals sind deswegen auch innerhalb der Familie Elternteil/Kind gleichzeitig betroffen.
   * Frauen haben womöglich durch Mutationen dieser Gene aufgrund von regelmässigen Entzündungen im Körper (monatliche Menstruation) eher entsprechende genetische Veranlagung, was erklären könnte weshalb schätzungsweise 70% der Betroffenen Frauen sind.

**Hypothesen und Mechanismen im Detail**

**Überproduktion von H₂O₂**

* Die Überproduktion von Wasserstoffperoxid durch chronische Entzündungen könnte eine zentrale Rolle bei der Entwicklung der Symptome spielen. Diese Moleküle greifen Zellen und Gewebe an, wenn sie nicht ausreichend neutralisiert werden.

**Tryptophan-Stoffwechsel und Niacin**

* Chronischer oxidativer Stress kann den Tryptophan-Stoffwechsel erheblich beeinflussen. Unter normalen Umständen wird Tryptophan in Serotonin umgewandelt, ein Neurotransmitter, der für die Regulierung von Stimmung, Schlaf und kognitiven Funktionen essenziell ist. Bei oxidativem Stress wird dieser Prozess jedoch gestört, und Tryptophan wird verstärkt in den Kynurenin-Weg geleitet. Dieser Weg führt unter ausreichender Tryptophanversorgung zu einer erhöhten Produktion von Niacin (Vitamin B3), einem Coenzym, das für den Energiestoffwechsel von zentraler Bedeutung ist.

**Langfristige Auswirkungen eines spezifischen Niacinmangels:**

* Wenn der Niacinbedarf des Körpers durch oxidativen Stress stark ansteigt und die Verfügbarkeit von Tryptophan nicht ausreicht, kann es trotz der Aktivierung des Kynurenin-Wegs zu einem **funktionellen Niacinmangel** kommen. Dieser Mangel beeinträchtigt zahlreiche physiologische Prozesse, da Niacin für die Bildung von NAD+ und NADP+ benötigt wird – Moleküle, die für Energieproduktion, DNA-Reparatur und antioxidative Schutzmechanismen unverzichtbar sind.
* Ein Niacinmangel äussert sich häufig in Symptomen wie **anhaltender Müdigkeit, Konzentrationsproblemen, neurologischen Beeinträchtigungen und Schlafstörungen.** Langfristig verschärfen diese Defizite die mitochondriale Dysfunktion und die antioxidative Erschöpfung, wodurch ein Teufelskreis entsteht, der die Symptome von Long-COVID oder Post-Vac weiter verstärken kann.
* Zusätzlich können neurotoxische Metaboliten wie **3-Hydroxykynurenin**, die ebenfalls im Kynurenin-Weg gebildet werden, oxidativen Stress im Nervensystem erhöhen. Diese Verbindungen verstärken systemische Schäden und tragen möglicherweise zu kognitiven Einschränkungen und anderen neurologischen Symptomen bei.

**Kettenreaktion im Stoffwechsel:**

* Oxidativer Stress kann eine Kaskade von Stoffwechselveränderungen auslösen. Zum Beispiel wird der Tryptophan-Stoffwechsel in den Kynurenin-Weg geleitet, was die Produktion von Serotonin hemmt und Niacin priorisiert. Gleichzeitig werden mitochondriale Funktionen beeinträchtigt, was zu einer Verringerung der Energieproduktion führt. Auch der Glukosestoffwechsel kann gestört werden, was Insulinresistenz begünstigt. Diese Veränderungen verstärken sich gegenseitig und können langfristig zu chronischer Erschöpfung und systemischen Entzündungen führen. Durch die Erschöpfung antioxidativer Ressourcen werden Entzündungen verstärkt, was wiederum die Mitochondrien weiter schädigt. Diese Dysfunktion der Mitochondrien führt zu Energieengpässen und verstärkt den oxidativen Stress, wodurch ein Teufelskreis entsteht.

**Langfristige Folgen:**

* Anhaltender oxidativer Stress kann die Funktion der Mitochondrien beeinträchtigen und die Energieproduktion dauerhaft stören. Gleichzeitig können latente Viren wie EBV durch eine TH2-Dominanz wieder aktiviert werden, was zusätzliche Symptome verursacht.

**Gesamtübersicht der aktuellen Forschungsansätze**

Aktuell werden verschiedene Mechanismen unabhängig voneinander oder in Kombination untersucht, um die Rolle von oxidativem Stress und anderen Faktoren bei Long-COVID und Post-Vac zu verstehen. Diese Mechanismen scheinen eng miteinander verbunden zu sein, da oxidativer Stress nicht nur direkt Zellschäden verursacht, sondern auch Entzündungsprozesse antreibt, die wiederum Stoffwechselveränderungen wie eine Verschiebung des Tryptophan-Stoffwechsels und Insulinresistenz hervorrufen können. Dadurch entsteht eine komplexe Interaktion, die die Symptome und deren Chronizität beeinflusst.

Zu den Schwerpunkten gehören:

* **EBV-Reaktivierung:** Analyse, wie das Virus durch eine geschwächte Immunantwort reaktiviert werden könnte.
* **Oxidativer Stress:** Erforschung des Ungleichgewichts zwischen freien Radikalen und Antioxidantien.
* **Tryptophan-/Serotonin-Stoffwechsel:** Untersuchung der Verschiebung in der IDO-Aktivität und der Kynurenin-Produktion.
* **Insulin-/Glukagonsynthese:** Untersuchung möglicher Stoffwechselveränderungen im Zusammenhang mit Glukose.
* **Immunstatus:** Analyse von TH1/TH2-Verschiebungen und möglichen immunsuppressiven Zuständen.
* **TH2-Dominanz und Histamin:** Überprüfung, wie eine Verschiebung in der Immunantwort Entzündungen und Symptome beeinflusst.

**Diagnostische Ansätze**

1. **Biomarker für oxidativen Stress:**
   * **Glutathion-Status:** Bewertet die Fähigkeit des Körpers, freie Radikale abzubauen.
   * **Superoxiddismutase (SOD):** Ein Enzym, das für die Neutralisierung freier Radikale wichtig ist.
   * **8-ISO-Prostaglandin:** Marker für oxidative Schäden an Zellmembranen.
2. **Laborwerte zur Entzündungsanalyse:**
   * C-reaktives Protein (CRP) und andere Entzündungsmarker.
   * Analyse des Tryptophan-Niacin-Stoffwechsels.
3. **Mitochondriale Funktionsanalysen:**
   * Untersuchung der Zellatmung und Energieproduktion, um mitochondriale Schäden zu bewerten.

**Therapeutische Ansätze**

Es gibt verschiedene Ansätze, die untersucht werden, um oxidativen Stress und dessen Auswirkungen bei Long-COVID und Post-Vac zu behandeln. Diese umfassen Massnahmen zur Reduktion des oxidativen Stresses, zur Unterstützung des Immunsystems und zur Förderung der mitochondrialen Gesundheit. Es ist jedoch entscheidend, diese Optionen systematisch und wissenschaftlich fundiert zu prüfen, um die effektivste und sicherste Therapierung zu identifizieren.

Die vorliegenden Ansätze sind als mögliche Richtungen zu betrachten, deren Wirksamkeit noch weiter erforscht werden muss.

**Es wäre jedoch denkbar, dass der oxidative Stress eine zentrale Rolle im Krankheitsbild spielt und einen Ursprung darstellen könnte für einen grossen Teil von Folgeerkrankungen und Symptomen. Das gilt es nun herauszufinden!**

**Wichtige Hinweise**

* Alle genannten Hypothesen basieren auf aktuellen Erkenntnissen und sollten durch weitere Forschung validiert werden.
* Diagnostische und therapeutische Massnahmen müssen individuell und in Absprache mit Fachärzten erfolgen.
* Interdisziplinäre Zusammenarbeit ist essenziell, um die komplexen Mechanismen zu verstehen und effektive Behandlungen zu entwickeln.
* ***Ich habe diese Zusammenfassung mithilfe von KI schreiben lassen und kann nicht garantieren, dass alles zu vollumfänglich korrekt ist. Mir war es wichtig ein bisschen im Detail über den neuen Ansatz berichten zu können, den wir jetzt angehen wollen mit Hilfe von verschiedenen Fachleuten wie u.a Frau Fux (Immunologin). Ich versuche aktuell auch die Verbände (zB. Long-Covid-Schweiz oder PVS Schweiz) einzubinden und Fachleute aufmerksam zu machen auf diese Zusammenhänge.***

**Fazit**

Oxidativer Stress könnte ein Schlüsselfaktor bei der Entstehung von Long-COVID und Post-Vac sein. Eine frühzeitige Diagnostik und individuell angepasste Therapieansätze könnten Betroffenen helfen, Symptome zu lindern und ihre Lebensqualität zu verbessern. Langfristig ist intensivere Forschung notwendig, um die genauen Mechanismen zu entschlüsseln und effektive Behandlungsstrategien zu entwickeln.